



# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

SEDE GUAYAQUIL

## **CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

### **INGENIERO ELÉCTRICO**

Proyecto Técnico Investigativo

### **“CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE UNA MÁQUINA EÓLICA PARA SER IMPLEMENTADA EN LA UPS-SEDE GUAYAQUIL”**

#### **AUTORES**

EDWARD JOSUÉ LÓPEZ LOZANO

JOSUÉ ELVIN VILLAMAR DE LA CRUZ

#### **TUTOR**

ING. DAVID CÁRDENAS VILLACRES.

**Guayaquil – Ecuador**

**2018**

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS**

Nosotros, **EDWAR JOSUÉ LOPEZ LOZANO**, con documento de identificación N° **0940499130**, y **JOSUÉ ELVIN VILLAMAR DE LA CRUZ**, con documento de identificación N° **0926636119**, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado titulado **“CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE UNA MÁQUINA EÓLICA PARA SER IMPLEMENTADA EN LA UPS-SEDE GUAYAQUIL”** mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autor nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que se hace entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Junio de 2018

---

**EDWAR JOSUÉ LOPEZ LOZANO**

**0940499130**

---

**JOSUÉ ELVIN VILLAMAR DE LACRUZ**

**0926636119**

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR**

Yo, DAVID HUMBERTO CARDENAS VILLACRES, director del proyecto de Titulación denominado “CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO DE UNA MÁQUINA EÓLICA PARA SER IMPLEMENTADA EN LA UPS-SEDE GUAYAQUIL” realizado por los estudiantes, EDWARD JOSUÉ LÓPEZ LOZANO y JOSUÉ ELVIN VILLAMAR DE LA CRUZ, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, Junio 2018

---

DAVID HUMBERTO CARDENAS VILLACRES  
TUTOR DEL TRABAJO DE TITULACION

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **EDWAR JOSUÉ LOPEZ LOZANO** y **JOSUÉ ELVIN VILLAMAR DE LA CRUZ**, autorizamos a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro. Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, Junio 2018

---

**EDWAR JOSUÉ LOPEZ LOZANO**

**CI: 0940499130**

---

**JOSUÉ ELVIN VILLAMAR DE LA CRUZ**

**CI: 0926636119**

## DEDICATORIAS

Siempre dirigido mis logros hacia mi Señor que me supo dar la perseverancia para poder llegar hacia una de las metas que me prepuse, sin su ayuda esto no hubiese sucedido, a mi esposa por su ayuda incondicional, a mis padres porque supieron guiarme hacia al camino de la lucha y entrega, a mi hijo por ser el motor de todo lo que emprendo y a toda mi familia que supieron dar su mano en momentos difíciles.

*Josué Elvin Villamar De la Cruz*

De manera primordial agradezco a Dios, ya que para mí, cada logro, es porque Él de alguna manera se hace presente.

A mi madre, quien indiscutiblemente ha estado durante todo el proceso de mi vida, es quien me apoya y me alienta en cualquier circunstancia, para ella, este gran paso.

A familiares y amigos que han sabido sustentarme en situaciones específicas de mi vida, dando ayuda y solución cuando les he solicitado ayuda.

*Edward Josué López Lozano*

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro más sinceros agradecimientos a Dios primero, segundo a nuestras familias que con su incondicional ayuda logramos este valioso paso hacia un mejor porvenir.

Como no resaltar a nuestros guías dentro de nuestra tesis, al Ing. David Cárdenas que con impulso, perseverancia y conocimiento nos brindó la ayuda necesaria para poder culminar nuestro proyecto, al Ing. Carlos Chávez nuestro guía técnico que aportó con todo el conocimiento aprendido, nos direccionó para lograr y culminar nuestro prototipo.

A cada uno de nuestros superiores en el campo laboral por confiar en nosotros y por brindarnos tiempo necesario para poder estudiar y lograr una superación personal.

## ABREVIATURAS

<b>A</b>	Área
<b>CELEC E.P</b>	Corporación Eléctrica del Ecuador
<b>C<sub>p</sub></b>	Presión Constante
<b>C<sub>v</sub></b>	Volumen Constante
<b>E</b>	Energía Cinética
<b>GW</b>	Gigavatio
<b>GWh</b>	Gigavatio Hora
<b>HAWT</b>	Horizontal axis wind turbine
<b>K<sub>v</sub></b>	Kilovoltios
<b>m</b>	Masa del viento
<b>MI&amp;T</b>	Company Marine Innovation & Technology
<b>msnm</b>	Metro sobre el nivel del mar
<b>MW</b>	Megavatio
<b>NACA</b>	Consejo Nacional para la Aeronáutica
<b>NASA</b>	Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio
<b>P</b>	Potencia
<b>PNBV</b>	Plan Nacional del Buen Vivir
<b>S</b>	Flujo
<b>SEP</b>	Sistema Eléctrico de Potencia
<b>V</b>	Velocidad del viento
<b>W</b>	Vatio
<b>ρ</b>	Densidad del aire

## SIMBOLOGÍA

<b>Ar</b>	Argón
<b>Cd</b>	Coeficiente de arrastre
<b>Cl</b>	Coeficiente de sustentación
<b>Fd</b>	Fuerza de arrastre
<b>g</b>	Gravedad
<b>J/Kg K</b>	Unidad de medida de los calores específicos
<b>K</b>	Kelvin
<b>Kg/Kmol</b>	Unidad de medida de la masa molecular
<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	Unidad de medida de la densidad del aire
<b>M</b>	Masa molecular
<b>Mbar</b>	mili Bar
<b>m/s</b>	Unidad de medida del viento
<b>N<sub>2</sub></b>	Di nitrógeno
<b>O<sub>2</sub></b>	Dioxígeno
<b>Rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>R'</b>	Constante del gas
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>°F</b>	Fahrenheit
<b><math>\alpha</math></b>	Ángulo de ataque
<b><math>\beta</math></b>	Ángulo de calaje
<b><math>\emptyset</math></b>	Ángulo entre el plano de rotación y la velocidad relativa
<b><math>\Omega</math></b>	Velocidad relativa en un punto
<b><math>\tau</math></b>	Torque



## RESUMEN

**Palabras clave:** TESIS, PROTOTIPO, EJE HORIZONTAL, MAQUINA EÓLICA.

*Este proyecto continua con el estudio de energías renovables que se implementa dentro de la carrera de Ingeniería Eléctrica en la materia Centrales, con la finalidad de abrir nuevos conocimientos impartidos desde la parte teórica hacia la práctica.*

*Nuestro proyecto propone el estudio y análisis de la turbina eólica de eje horizontal para un generador asíncrono de imanes permanentes ya existente.*

*Con la turbina de eje horizontal captamos la energía del viento para transformarlo en energía mecánica, esta energía será transmitida por los ejes y así la energía mecánica será convertida a energía eléctrica por medio del generador de imanes permanentes.*

*El prototipo está diseñado para alcanzar la mayor captación del viento, el cual está instalado en la terraza del edificio ubicado en las cercanías del Rio Guayas.*

*Durante un periodo de meses se tomaron medidas de la velocidad del viento en el sitio de instalación las cuales dieron como resultado un promedio de la velocidad del viento de 3.1m/s.*

*Con estas medidas se dio inicio al diseño y construcción del prototipo con sus diferentes partes mecánicas las cuales serán implementadas en el generador de imanes permanentes.*

## ABSTRACT

**Keywords:** THESIS, PROTOTYPE, HORIZONTAL AXIS, WIND POWER.

*This Project continues with the study of renewables energy's which found within the electrical engineering field in the subject of Centrals, with the target of opening new knowlegements acquired from the objective point of view to practical terms.*

*Our project proposes the study and analysis of wind power of horizontal axis for asynchronous permanent magnets gen set.*

*With horizontal axis wind power we collect the energy from the wind and changed it into mechanical energy, this energy will be transferred by the axis this the mechanical energy will be converted into electrical energy by mean of permanent magnets gen set.*

*This prototype is designed to reach the full wind power, which is installed on the roof of the building located nearby Guayas River.*

*During a period of months wind velocity measurements were taken in the site which gave as the result an average wind velocity of 3.1 m/s.*

*With this measurements taken we the designed and construction of prototype with its different mechanical parts which will be implement in the permanent magnets gen set.*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	II
CAPÍTULO 1 .....	2
1. MARCO GENERAL .....	2
1.1. Descripción del problema. ....	2
1.2. Importancia y alcances .....	2
1.3. Delimitación.....	2
1.4. Objetivos .....	3
1.5. Marco metodológico. ....	4
CAPÍTULO 2.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. La energía renovable.....	5
2.2. Potencia del viento. ....	6
2.3. Velocidad del viento. ....	8
2.4. Tipos de aerogeneradores eólicos. ....	9
2.5. La evolución de la energía eólica.....	10
2.6. Parque eólico Villonaco. ....	13
2.7. Modernos aerogeneradores. ....	15
2.8 Aerogenerador off shore flotante de MI&T .....	15
2.8. Diseño moderno de aerogeneradores. ....	16
2.9. Partes de una turbina. ....	17
CAPÍTULO 3.....	21
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	21
3.1. Método experimental. ....	21
3.2. Técnicas de investigación. ....	21
3.3. Descripción de las pruebas de parámetros. ....	22
3.3.4. Diseño de las palas. ....	28
3.3.4.2. Partes del perfil aerodinámico.....	28
3.3.4.2.1. Cuerda. ....	28
3.3.4.2.2. Borde.....	28
3.3.4.2.3. Borde de salida.....	28
3.3.4.2.4. Extradós. ....	28
3.3.4.2.5. Intradós.....	28
3.3.4.2.6. Línea de curvatura media. ....	28
3.3.4.2.7. Radio de curvatura. ....	28
3.3.4.2.8. Espesor máximo.....	28
3.3.5. Funcionamiento del perfil aerodinámico. ....	29
3.3.6. Diseño del sistema de transmisión. ....	37
3.3.7. Funcionamiento del sistema de transmisión. ....	42
CAPÍTULO 4.....	47
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	47

4.1. Mediciones del viento .....	47
4.2. Prueba a vacío .....	48
4.3. Prueba con generador .....	50
CAPÍTULO 5 .....	52
5. CONCLUSIONES .....	52
RECOMENDACIONES .....	53
REFERENCIA BIBLIOGRAFICA .....	54
Bibliografía .....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana Campo Guayaquil. ....	3
<b>Figura 2:</b> Energía renovable reduce $CO_2$ .....	5
<b>Figura 3:</b> Impacto sobre las aves.....	6
<b>Figura 4:</b> Flujo de aire a través de una sección circular.....	7
<b>Figura 5:</b> Instrumento de medición Anemómetro.....	8
<b>Figura 6:</b> Estructuras de turbinas eólicas de eje horizontal y vertical. ....	10
<b>Figura 7:</b> Evolución del tamaño de las turbinas eólicas y sus respectivas capacidades.....	11
<b>Figura 8:</b> Producción de Energía Eólica Mundial en el 2014. ....	12
<b>Figura 9:</b> Parque Eólico Terrestre de 69MW en Escocia de Iberdrola. ....	12
<b>Figura 10:</b> Eólica marina: London Array, el parque eólico marino más grande del mundo con aerogeneradores de Siemens.....	13
<b>Figura 11:</b> Parque Eólico Villonaco ubicado en la ciudad de Loja. ....	14
<b>Figura 12:</b> Aerogeneradores del tipo GW70/1500.....	14
<b>Figura 13:</b> Turbinas off shore flotante y sus bases estables.....	15
<b>Figura 14:</b> Turbinas off shore flotante trabajando en alta mar. ....	16
<b>Figura 15:</b> Aspas hechas con láminas de fibra de vidrio. ....	17
<b>Figura 16:</b> Caja multiplicadora de revoluciones por minuto. ....	17
<b>Figura 17:</b> Generador de imanes permanentes.....	18
<b>Figura 18:</b> Veleta direcciona a la as aspas. ....	18
<b>Figura 19:</b> Torre de un aerogenerador. ....	19
<b>Figura 20:</b> Sistema de control en un aerogenerador. ....	20
<b>Figura 21:</b> Estructura vertical de la atmosfera terrestre.....	23
<b>Figura 22:</b> Esquema de la dirección general del viento en la atmosfera.....	26
<b>Figura 23:</b> Perfil aerodinámico de una pala. ....	29
<b>Figura 24:</b> Ángulos que actúan en un perfil aerodinámico.....	32
<b>Figura 25:</b> Ángulos que actúan en un perfil aerodinámico.....	33
<b>Figura 26:</b> Dimensión de la cuerda (c).....	34
<b>Figura 27:</b> Cl vs Alpha.....	34
<b>Figura 28:</b> Fuerza de sustentación. ....	35
<b>Figura 29:</b> Fuerza Motriz. ....	36
<b>Figura 30:</b> Diferenciales mecánicos superior e inferior.....	38
<b>Figura 31:</b> Eje de transmisión. ....	38
<b>Figura 32:</b> Chumacera.....	39
<b>Figura 33:</b> Partes internas y externas de un cojinete.....	39
<b>Figura 34:</b> Piñón mecánico. ....	40
<b>Figura 35:</b> Cadena de transmisión. ....	40
<b>Figura 36:</b> Polea en aluminio reforzada.....	41
<b>Figura 37:</b> Banda de transmisión. ....	41
<b>Figura 38:</b> Acoplamiento elástico entre los dos ejes.....	42

<b>Figura 39:</b> Eje transmisión horizontal compuesto por un diferencial, un soporte en L, una chumacera y una torta de sujeción para las palas. ....	42
<b>Figura 40:</b> Tortas con sus cojinetes. ....	43
<b>Figura 41:</b> Compartimentos para mantenimiento de cojinetes. ....	43
<b>Figura 42:</b> Velea en forma vertical para dar dirección a las aspas. ....	44
<b>Figura 43:</b> Fijación con tensores.....	44
<b>Figura 44:</b> Cubierta exterior.....	45
<b>Figura 45:</b> Soporte para cubierta exterior. ....	45
<b>Figura 46:</b> Caja elevadora de velocidades con el Generador de imanes permanentes. ....	46
<b>Figura 47:</b> Anemómetro instrumento de medición del viento. ....	47
<b>Figura 48:</b> Analizador de redes Fluke 430.....	50
<b>Figura 49:</b> Datos adquiridos con un Analizador de redes.....	51
<b>Figura 51:</b> Prototipo instalado en el Bloque E cerca del rio Guayas. ....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Propiedades termodinámicas del aire seco. ....	22
<b>Tabla 2:</b> Estructura atmosférica según el gradiente térmico. ....	24
<b>Tabla 3:</b> Características de la atmosfera estándar. ....	25
<b>Tabla 4:</b> Direcciones de viento dominantes a escala del globo terrestre ....	26
<b>Tabla 5:</b> Escala Beaufort de intensidades de viento.....	27
<b>Tabla 6:</b> Temperatura promedio por cada mes durante el año. ....	27
<b>Tabla 7:</b> Velocidad promedio del viento durante 6 meses. ....	27
<b>Tabla 8:</b> Mediciones obtenidas por el tacómetro. ....	48
<b>Tabla 9.</b> Primera amplificación. ....	49
<b>Tabla 10.</b> Segunda amplificación. ....	49
<b>Tabla 11.</b> Tercera amplificación.....	50
<b>Tabla 12:</b> Tabla de resultados experimentales. ....	51

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> Energía Cinética.....	6
<b>Ecuación 2.</b> Densidad de la energía cinética .....	7
<b>Ecuación 3.</b> Energía Cinética por volumen de aire.....	7
<b>Ecuación 4.</b> Potencia Eléctrica.....	8
<b>Ecuación 5.</b> Densidad del aire.....	22
<b>Ecuación 6.</b> Fuerza de arrastre.....	30
<b>Ecuación 7.</b> Fuerza de arrastre.....	30
<b>Ecuación 8.</b> Velocidad relativa.....	32
<b>Ecuación 9.</b> Fuerza de sustentación.....	34
<b>Ecuación 10.</b> Fuerza motriz.....	36
<b>Ecuación 11.</b> Torque.....	36
<b>Ecuación 12.</b> Potencia en función del torque.....	36
<b>Ecuación 13.</b> Rpm según velocidad tangencial.....	48
<b>Ecuación 14.</b> Relación entre poleas.....	49



# INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía eólica ha demostrado ser una tecnología en crecimiento tanto por su viabilidad y economía [1]. Dentro del diseño es importante tomar aspectos ambientales como el viento, la temperatura, la presión atmosférica, la ubicación geográfica, la dirección, etc.

Durante los últimos años se ha desarrollado más el estudio de las turbinas eólicas, porque es una alternativa para erradicar los contaminantes fósiles, los cuales están destruyendo nuestro medio ambiente, y así poder ofrecer una energía limpia [2].

Este prototipo fue implementado para el análisis y comportamiento de una turbina eólica, la cual es de complemento para la materia Centrales. Esto es fundamental para que los estudiantes analicen los diferentes parámetros que actúan sobre un prototipo: como son la densidad del aire, los coeficientes aerodinámicos, velocidad del viento, el área, etc.

El diseño es adaptado a los elementos que se encuentran dentro de nuestro mercado, los de fácil acceso, y así poder determinar si es accesible y beneficioso el uso de un sistema eólico dentro de nuestra área o entorno. La ubicación del prototipo es en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, se consideró el edificio E, para aprovechar la altura del edificio, este es el más grande y está en la cercanía del río Guayas.

Dentro del proyecto se hicieron diversas pruebas para ver el funcionamiento mecánico y eléctrico, y así ver la eficiencia que tiene el generador de imanes permanentes el cual fue desarrollado por otros compañeros.

# CAPÍTULO 1

## 1. MARCO GENERAL

Este capítulo describe el problema de los cuales se plantean las distintas alternativas o soluciones para el diseño y construcción del prototipo.

### 1.1. Descripción del problema.

Actualmente, la “**Universidad Politécnica Salesiana - Sede Guayaquil**” no cuenta con un modelo practico asociado con el Sistema de Generación Eólico, lo cual no produce un completo conocimiento (teórico-práctico) acerca de dicho tema, ya que las clases impartidas por los docentes en las aulas solo abarcan la parte teórica.

También existe la necesidad de que en la Universidad exista un prototipo de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) como recurso educativo, por lo cual, este proyecto, cubriría una de las partes, **la generación**.

De esta manera, estaríamos dando cumplimiento con el **Objetivo 11 del Plan Nacional del Buen Vivir (PNBV)** que dice “**Asegurar la soberanía y eficiencia de los sectores estratégicos para la transformación industrial y tecnológica**”

### 1.2. Importancia y alcances

El prototipo pondrá en funcionamiento al generador que se encuentra ubicado en los laboratorios de la Universidad.

El alcance de este proyecto tiene como finalidad dar funcionamiento al generador de imanes permanentes que se encuentra ubicado en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil.

Se realizan mediciones en el generador para ver el comportamiento y la eficiencia que se pueda obtener mediante la turbina eólica.

### 1.3. Delimitación

Este trabajo tiene como delimitación los siguientes puntos:

- La estructura tendrá como mínimo tres metros de altura (se obtendrá gran altura al posicionarse en la azotea del edificio de la universidad).
- Realizada con materiales como hierro y aluminio.
- Acabado en color blanco, simulando energía limpia.

- Las dimensiones de las aspas (largo, ancho, peso, forma, tipo, etc.), dependerán de los indicadores importantes como velocidad y dirección del viento, densidad de potencia, altura, rugosidad y pendiente del terreno, entre otras.

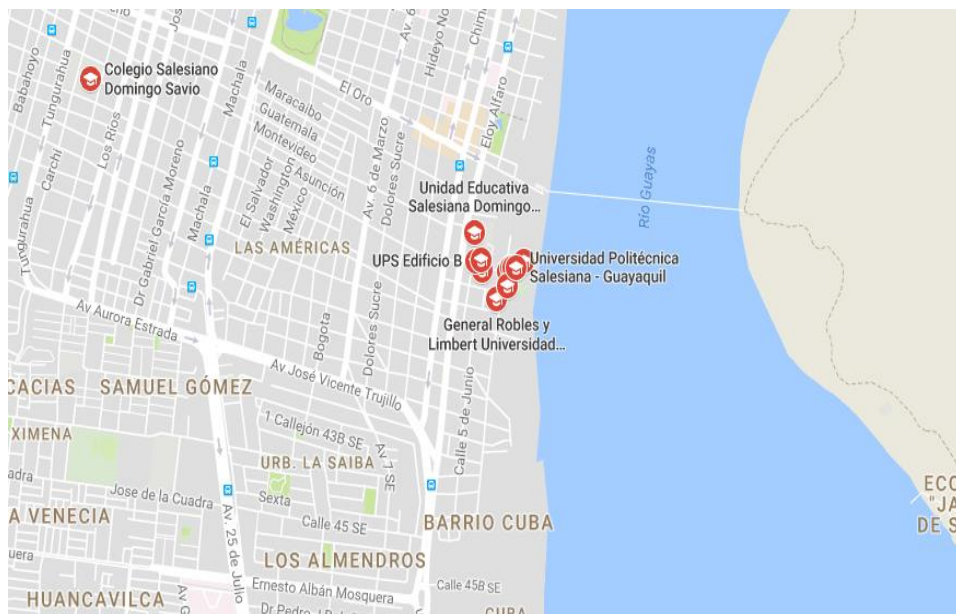
## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Construir un prototipo de una maquina eólica empleando un generador con imanes de neodimio para ser implementado en la Facultad de Ingenierías de la UPS – SEDE GUAYAQUIL. [Figura 1].

### 1.4.2. Objetivo específico

- Determinar el tipo de materiales idóneos para la construcción del prototipo de acuerdo a los parámetros climáticos del sector.
- Dimensionar las partes principales de máquina eólica según los requerimientos del aerogenerador.



**Figura 1:** Ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana Campo Guayaquil.

*Fuente: Googlemaps [3]*

## **1.5. Marco metodológico.**

Para el proyecto se emplean los siguientes métodos de investigación:

- El método analítico nos ayuda a dividir todo el proyecto, una vez dividido extraemos la parte más importante para crear nuevos conceptos desde lo práctico hacia lo teórico.
- El método sintético lo utilizamos para unificar todas las partes separadas para así encontrar la parte principal del proyecto y sus particularidades.
- El método inductivo permite sacar conclusiones, desde la obtención de los resultados experimentales hacia la parte teórica, así definimos recomendaciones para futuros proyectos o experimentos.

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. La energía renovable.

Es la transformación del movimiento de una masa de aire que transporta energía cinética y la convierte en energía mecánica que a su vez se convierte en energía eléctrica a través de generadores eléctricos y de elementos mecánicos; esta energía que se genera puede ser almacenada en baterías o se puede conectar directamente a la red eléctrica.

La energía eólica contiene diferentes ventajas que a continuación se detallan:

- Cero emisiones de gases contaminantes.
- No necesita líquidos, ni residuos sólidos.
- Disminuye el  $CO_2$  (dióxido de carbono). [Figura 2].
- No demanda de minería, ni de extracción subterránea.
- No implica riesgos ambientales de gran impacto (por derrames, explosiones, incendios, etc.).
- Evita los combustibles y diversifica el suministro energético.
- No requiere de constantes mantenimientos.



**Figura 2:** Energía renovable reduce  $CO_2$ .

*Fuente: (Theme by MyThemeShop, s. f.) [4]*

No obstante, existen desventajas al momento de considerar una turbina eólica las cuales se detallan:

- Aumento de los decibeles de ruido, estos son molestos para las personas que viven cerca de una turbina.
- Impacto sobre la fauna, en particular sobre las aves. [Figura 3].
- Los aerogeneradores deben estar distanciados entre sí, debido a que existen efectos de interferencia y de estela.
- Existen interferencias con transmisiones electromagnéticas, esto puede ser producido por el rotor.



**Figura 3:** Impacto sobre las aves.

*Fuente: (Comunidad ISM, s. f.) [5]*

## 2.2. Potencia del viento.

Se define como viento al movimiento de la masa de aire, dentro de la masa de aire encontramos propiedades que la definen como la temperatura, humedad, volumen y altura, todos estos factores conforman la densidad del aire, cuando la densidad de esta masa es baja, es movida con una velocidad ( $V$ ), en la siguiente ecuación [1] podemos ver que la energía cinética es el resultante de la masa por la velocidad:

$$E = \frac{1}{2} m * V^2 \quad [1]$$

- a)  $E = \text{Energía Cinética} = \frac{\text{kg} * \text{m}^2}{\text{s}^2}$
- b)  $m = \text{masa del viento} = \text{Kg}$
- c)  $V = \text{Velocidad del viento} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Si en la ecuación de la energía cinética incluye la masa de aire, de la misma forma actúa la densidad del aire, la cual se la representa con el símbolo  $\rho$ , por tenemos la densidad de la energía cinética la que se expresa en la siguiente ecuación [2]:

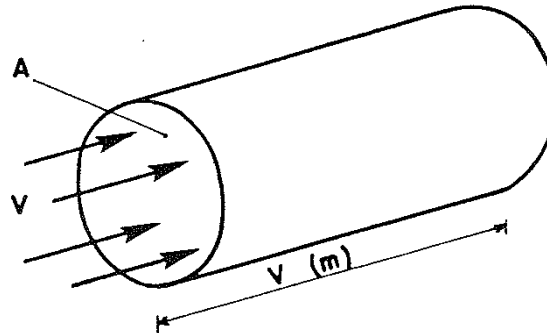
$$\rho_E = \frac{1}{2} \rho * V^2 \quad [2]$$

Donde:

- a)  $\rho_E = \text{Densidad de la energía cinética} = \frac{kg}{m*s^2}$
- b)  $V = \text{Velocidad del viento} = \frac{m}{s}$
- c)  $\rho = \text{Densidad del aire} = \frac{Kg}{m^3}$

Para analizar la potencia del viento estaremos una área (A), como se muestra en la [Figura 4], esta área será perpendicular a la dirección del viento, el viento que actúa dentro del área se lo considera como flujo de aire el cual está dado por la ecuación [3].

$$S = V * A \quad [3]$$



**Figura 4:** Flujo de aire a través de una sección circular

**Fuente:**(Muñoz, s.f.) [6]

Donde:

- a)  $S = \text{Flujo de aire}$
- b)  $V = \text{Velocidad del viento}$
- c)  $A = \text{Área}$

La potencia del flujo de aire a través de un área (A), es el flujo de la energía cinética por unidad de tiempo como se muestra en la ecuación [4].

$$P = \frac{1}{2} \rho * V^3 A \quad [4]$$

Donde:

- a)  $P = \text{Potencia} = w$
- b)  $\rho = \text{Densidad del aire} = \frac{kg}{m^3}$
- c)  $V = \text{Velocidad del viento} = \frac{m}{s}$
- d)  $A = \text{Area perpendicular} = m^2$

### 2.3. Velocidad del viento.

Es importante tener en consideración el lugar donde se instalara el prototipo para su correcto funcionamiento, el lugar será la cumbre o el fracaso de las estimaciones que se realicen, para las mediciones de viento se debe dar el proceso adecuado para tener datos certeros al plano real.

Para poder registrar las distintas mediciones o variaciones de viento que pasan a lo largo del tiempo se procede a utilizar un anemómetro [Figura 5] este equipo meteorológico es utilizado para medir diferentes variables que actúan sobre el viento las cuales son velocidad, humedad y temperatura.

Se debe considerar las mediciones en lugares de altura aproximadamente 10 metros sobre el nivel del suelo como mínimo, para poder obtener mejores resultados con respecto a la posición final del prototipo.



**Figura 5:** Instrumento de medición Anemómetro.

*Fuente: (Ecatepec, s. f.) [7]*



## 2.4. Tipos de aerogeneradores eólicos.

Dentro de los años los aerogeneradores eólicos han evolucionado, por esta razón se imparten varios criterios con respecto a su clasificación, a continuación se detallan:

a) Por su velocidad:

- Velocidad constante, cuando la fuerza de arrastre y la dirección del viento se mantienen.
- Velocidad variable, si la fuerza de arrastre o la dirección cambia, su velocidad no es constante.

b) Por su giro [Figura 6]:

- Eje Horizontal, su movimiento es paralelo con respecto al suelo.
- Eje Vertical, su movimiento es perpendicular con respecto al suelo.

c) Por número de aspas:

- Monopalas, corresponde al aerogenerador de una aspa.
- Bipalas, aerogenerador de dos aspas.
- Tripalas, tres aspas dando movimiento al rotor.
- Multipala, cuatro o más aspas que actúan en un aerogenerador.

d) Por generador eléctrico:

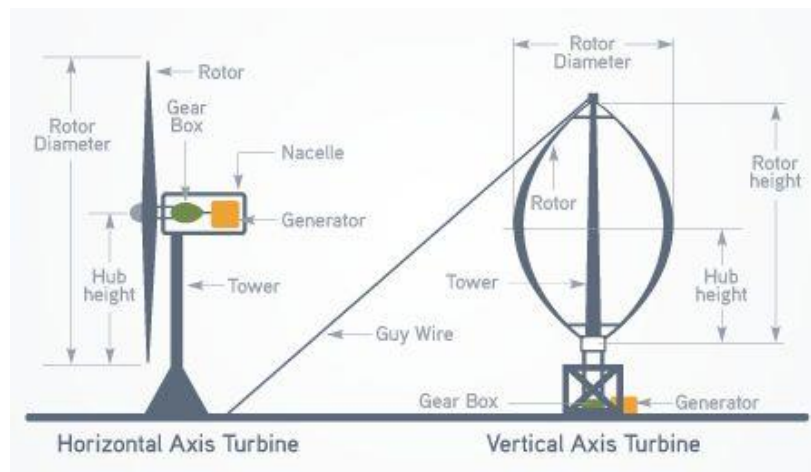
- Generador asíncrono con rotor en jaula de ardilla, con un núcleo magnético y en las ranuras barras de conducción.
- Generador asíncrono con rotor bobinado doblemente alimentado, con un núcleo magnético y conductor enrollado.

e) Por tipo de viento:

- Clase I, velocidad referencial 50 m/s.
- Clase II, velocidad referencial 42.5 m/s.
- Clase III, velocidad referencial 37.5 m/s.
- Clase IV, velocidad referencial 30 m/s.

f) Por su interconexión:

- Sistema eólico aislado, solo para caso de emergencia.
- Sistema eólico interconectado con la red eléctrica, para generación y comercialización.



**Figura 6:** Estructuras de turbinas eólicas de eje horizontal y vertical.

*Fuente: (CEMAER, s. f.) [8]*

## 2.5. La evolución de la energía eólica.

En la antigüedad las primeras herramientas eólicas fueron los molinos de vientos que fueron utilizados por los persas, egipcios, iraquíes y chinos.

Los babilonios utilizaron estos molinos para la distribución del agua en los cultivos y sembríos en las llanuras de la Mesopotamia y también utilizado para moler granos.

Las maquinas eólicas primitivas eran de rotor vertical y sus aspas de madera.

En el país de China se emplearon telas con base de madera estos servían para el sistema de bombeos de agua.

En Europa por la edad media por los países de Grecia, Francia e Italia empezaron a extender los sistemas de ejes horizontales a continuación vamos a ver diferentes ejemplos de su importación y aplicaciones.

Los molinos castellanos se dedicaron a moler, los conocidos molinos holandeses que desde 1430 estos eran utilizados para desecación de los polders, tierra secada por sistemas de bombeo.

En el siglo XVI perfeccionaron los diseños y aquellos fueron usados para el drenaje, también para extraer aceites de semilla, debido a la importancia para los holandeses se instalaron 20000 molinos eólicos para la generación de electricidad con una potencia media de 20kW cada uno.

En 1724 se efectuó un proyecto de un molino de ocho palas que movía una bomba de pistón, el molino multipala americano de 3 metros de diámetro utilizado para bombeo este fue el más vendido en su época llegando a fabricar más de 6 millones de aerogeneradores.

Los aerogeneradores Daneses de Dacourt en el año de 1892 estos fueron capaz de dar una potencia de 5 a 25 kW.

Los daneses desarrollaron mejores versiones instalando un aerogenerador de 200MW de potencia eólica.

En 1927, el holandés Dekker construyo el primer rotor provisto de aspas ya con una aplicación aerodinámica, esto era debido a la aparición de los primeros aviones.

Dentro de la primera guerra mundial las turbinas eólicas tomaron dos caminos diferentes.

Por un rumbo se comercializaban aerogeneradores de baja potencia con la capacidad de generar electricidad en áreas rurales o casi asiladas donde la energía no llegaba a puntos específicos.

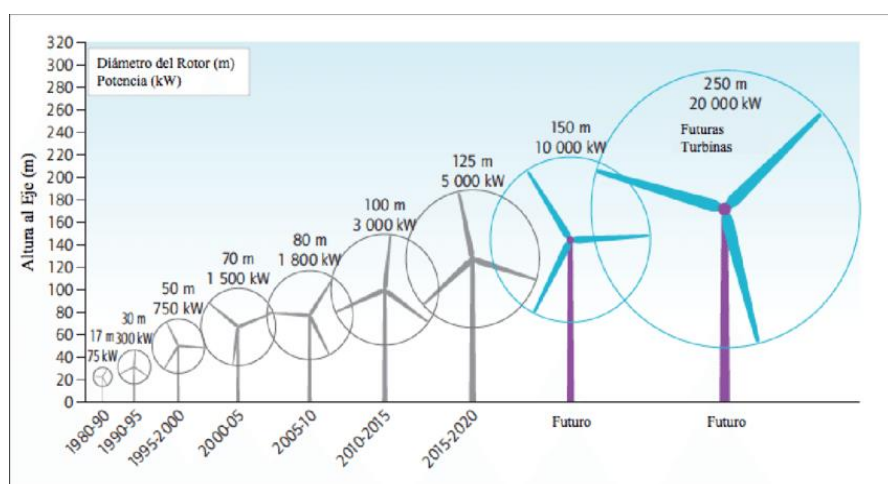
Por otro lado el desarrollo de las industrias demandaba potencia a gran escalas por esa razón se construyeron parque eólicos.

En 1931 en el mar negro se instalaron una maquina eólica de 100kW.

En los años 50 a finales de la segunda guerra mundial empezó el segundo periodo del desarrollo de la energía eólica, pero por la guerra hubieron escases de toda índole, posteriormente tuvo el petróleo un apogeo y el gran costo que requería hacer un prototipo ya en los año de 1973 cerró el desarrollo de la tecnología. Solamente Francia, Dinamarca e Inglaterra llevaron experimentos para el desarrollo de la energía eólica.

En los años 90 han aumentado la fiabilidad y la reducción de precios y se han fabricado prototipos de 225kW.

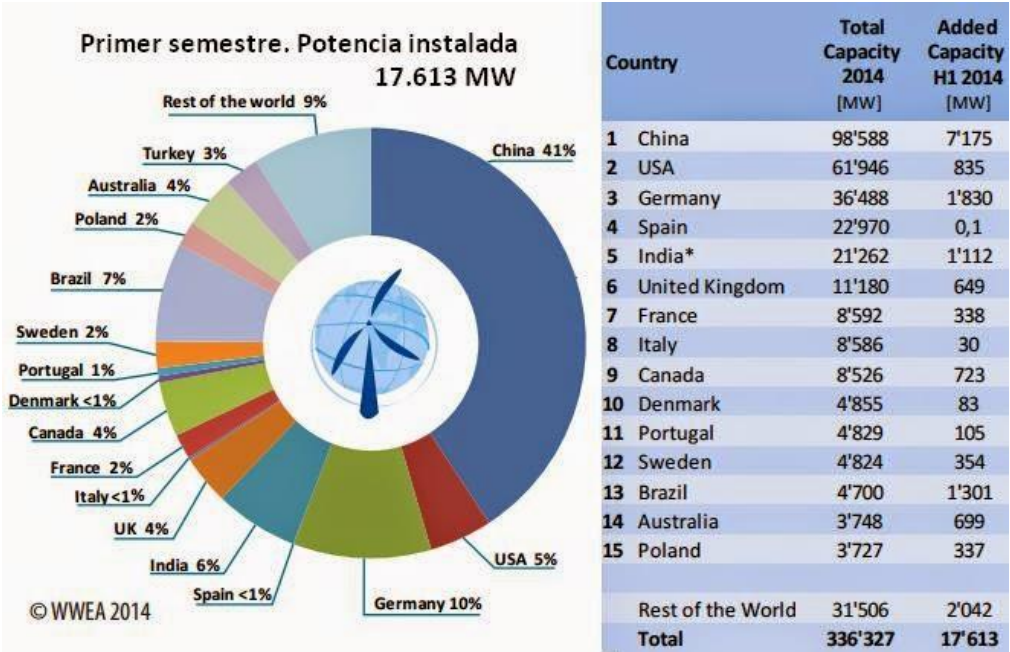
Y a lo largo del tiempo la energía renovable ha tomado impulso dentro de la sociedad y esto involucra crecimiento [Figura 7] y evolución tanto como en lo cinético, mecánico y eléctrico.



**Figura 7:** Evolución del tamaño de las turbinas eólicas y sus respectivas capacidades.

*Fuente: Evolucion-del-tamano-de-las-turbinas-eolicas.png, s. f.) [9]*

Por esta razón existen más países [Figura 8] que consideran a la energía eólica, una herramienta para provecho al momento de generar electricidad sin tener que contribuir al calentamiento global o a la contaminación del medio ambiente.



**Figura 8:** Producción de Energía Eólica Mundial en el 2014.

*Fuente: Potencia Instalada, s. f.) [10]*

No se concentraron en hacer una turbina potente sino en considerar parques [Figura 9] que unidos formen una gran potencia para su distribución y así abarcar más partes que contribuyan a la red.



**Figura 9:** Parque Eólico Terrestre de 69MW en Escocia de Iberdrola.

*Fuente: Uk energia eólica [11]*

Así mismo se instalaron sistemas eólicos aprovechando la fuerza del viento que actúa sobre el mar. [Figura 10]



**Figura 10:** Eólica marina: London Array, el parque eólico marino más grande del mundo con aerogeneradores de Siemens.

*Fuente: London Array [12]*

## **2.6. Parque eólico Villonaco.**

El parque Villonaco está ubicado en la provincia de Loja, considerado en un emblema Nacional esto debido a su importancia ya que contribuye con una potencia de 16.5 MW, fue construida en Agosto de 2011. [Figura 11]

Este parque eólico cuenta con 11 prototipos de aerogeneradores cada uno con una potencia de 1.5 MW, y abarcan un área de 2 km.

Estos aerogeneradores están ubicados a una altura de 2700 msnm lo cual tiene como promedio una velocidad anual de 12.7 m/s, los prototipos son tipo GW70/1500 [Figura 12]

Cuenta con una subestación de elevación que va de 34.5 kV/69 kV con una capacidad de 25 MVA y presenta un esquema de conexión de barra principal y transferencia.





**Figura 11:** Parque Eólico Villonaco ubicado en la ciudad de Loja.

*Fuente: Parque Villonaco, s. f.) [13]*

El parque aporta con el Sistema Nacional Interconectado con 358,63 GWh desde su entrada en operación, con una reducción de emisiones de  $CO_2$  de aproximadamente 32 Ton/año. En el Ecuador el mayor recurso renovable utilizado es el agua con sus hidroeléctricas, pero el sistema Villonaco beneficia y aporta al crecimiento de la energía renovable que tiene como materia prima el viento.



**Figura 12:** Aerogeneradores del tipo GW70/1500.

*Fuente: Parque eólico Villonaco [13]*

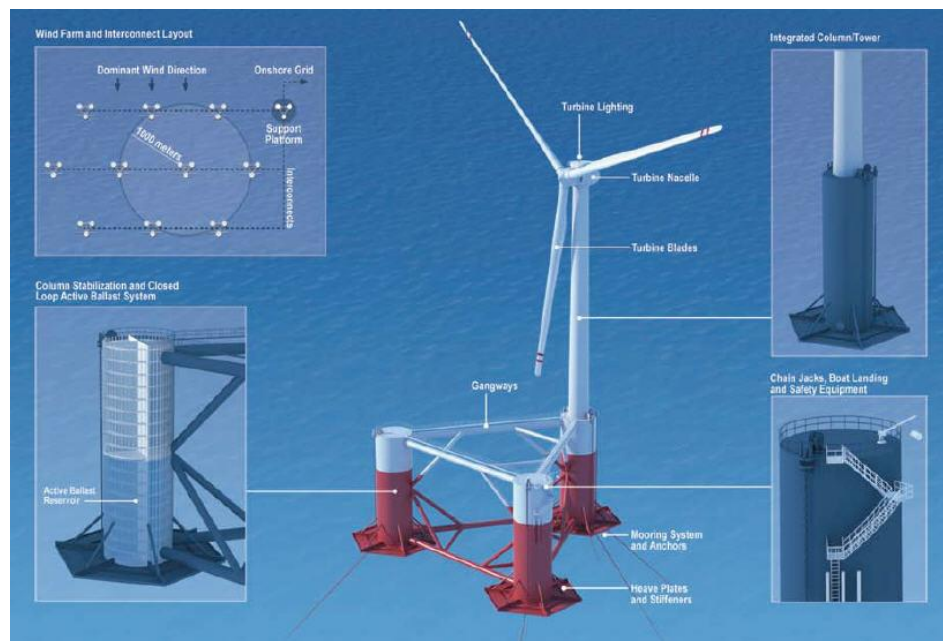
## 2.7. Modernos aerogeneradores.

Una turbina es una máquina que convierte la energía del viento en electricidad, las turbinas de viento son en realidad muy pequeña y están en el orden de kW o menos. En cuanto a la capacidad total de generación las turbinas pueden generar rangos bastantes grandes, en el rango de 50 kW a 2 MW.

En las turbinas modernas, el proceso de conversión se utiliza la aerodinámica básica para producir un par positivo neto sobre un eje de rotación, lo que resulta en primer lugar la producción de energía mecánica y luego en su transformación a la electricidad en un generador.

## 2.8 Aerogenerador off shore flotante de MI&T

Windfloat es creado por Marine Innovation & Technology (MI&T) como aerogeneradores *offshore* en español costa afuera, las ventajas de este diseño es que puede ser instalado con facilidad, dejando de preocupar el anclaje de la estructura al fondo del mar, tiene una buena estabilidad [Figura 13 y 14], su ensamble puede hacerse en tierra estas turbinas tienen una potencia nominal de 5 MW su altura oscila entre 100 metros con un rotor de aproximadamente 125 metros.



**Figura 13:** Turbinas off shore flotante y sus bases estables.

*Fuente: Windfloat [14]*



**Figura 14:** Turbinas off shore flotante trabajando en alta mar.

*Fuente: Windfloat [14]*

## **2.8. Diseño moderno de aerogeneradores.**

En la actualidad el diseño más común de la turbina de viento es el de eje horizontal (HAWT), todo esto por los grandes estudios que se han realizado tanto para rotor, el sistema de transmisión y el control permanente que se hace mediante equipos.

En la parte mecánica también ha crecido la tecnología, en los elementos podemos indicar que el rotor ahora está compuesto junto con las aspas, el tren de transmisión, y las piezas giratorias en la turbina de viento teniendo mejores funcionamientos, como por ejemplo la caja de cambios, de acoplamiento, un freno mecánico, y el generador. En el ámbito eléctrico también se puede indicar que el balance del sistema eléctrico ha evolucionado, esto incluye a los cables, interruptores, transformadores y convertidores.

Para la construcción de un prototipo eólico moderno se debe considerar los siguientes puntos:

- Número de aspas, tres a cuatro por lo general.
- La dirección del viento o contra el viento de la torre esto corresponde a la orientación.
- Perfil aerodinámico de las aspas, esto incluye el material.
- Diseño del cubo: rígida, tambaleante o con bisagras.
- La velocidad del rotor fijo o variable.
- Generador síncrono o inducción.
- Caja de cambios o generador de accionamiento directo.



## 2.9. Partes de una turbina.

### 2.9.1. Rotor

El rotor consiste en el cubo y las aspas de la turbina eólica, la mayoría de las turbinas de hoy usan rotores con tres o cuatro palas. Las hojas de la mayoría de las turbinas están hechas de materiales compuestos principalmente de fibra de vidrio reforzada de plástico [Figura 15], pero a veces se utilizan laminados de madera.



**Figura 15:** Aspas hechas con láminas de fibra de vidrio.

*Fuente: Palas de fibra [15]*

### 2.9.2. Tren de potencia

El tren de potencia o caja de velocidades consiste en las piezas giratorias de la turbina eólica, el propósito de la caja de cambios es para acelerar la velocidad de rotación del rotor esto quiere decir que aumenta la velocidad del eje de entrada, esto arranca de un valor bajo (decenas de rpm) a una velocidad de rpm adecuados para el accionamiento de un generador estándar. [Figura 16].



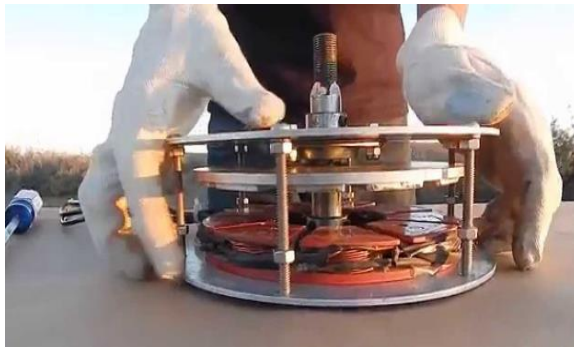
**Figura 16:** Caja multiplicadora de revoluciones por minuto.

*Fuente: Sincro Mecánica) [16]*

### 2.9.3. Generador

Por lo general todos los aerogeneradores utilizan generadores síncronos o de inducción [Figura 17]. Ambos diseños compromete una velocidad casi constante en el eje que se acopla al generador.

Los aerogeneradores de inducción, la electricidad es inducida por un rotor por inducción magnética en lugar de una conexión eléctrica directa, la mayoría de los aerogeneradores son instalados en aplicaciones industriales y en la red eléctrica debido a su bajo costo y su fácil manejo.



**Figura 17:** Generador de imanes permanentes.

*Fuente: Oscar García [17]*

### 2.9.4. Veleta.

La veleta está constituida por materiales no pesados debido a que el viento debe golpearla de tal forma que pueda moverse fácilmente.

Es puesta de forma vertical así tiene un sentido de rotación perpendicular al eje principal. Debe tener un área considerable para poder captar mayor cantidad de masa de viento. [Figura 18].



**Figura 18:** Veleta direcciona a la as aspas.

*Fuente: Venta al por mayor veleta de viento [18]*

### 2.9.5. La torre y cimentación

Estos ítems involucran la estructura inferior y la base de apoyo, en la actualidad se utilizan los tipos de pie gratis con tubo de acero, de celosía y torres de hormigón. La altura de la torre es típicamente de 1 a 1.5 veces el diámetro del rotor, pero en cualquier caso es normalmente de al menos 20 m. [Figura19].



**Figura 19:** Torre de un aerogenerador.

*Fuente: La primera torre eólica en argentina. [19]*

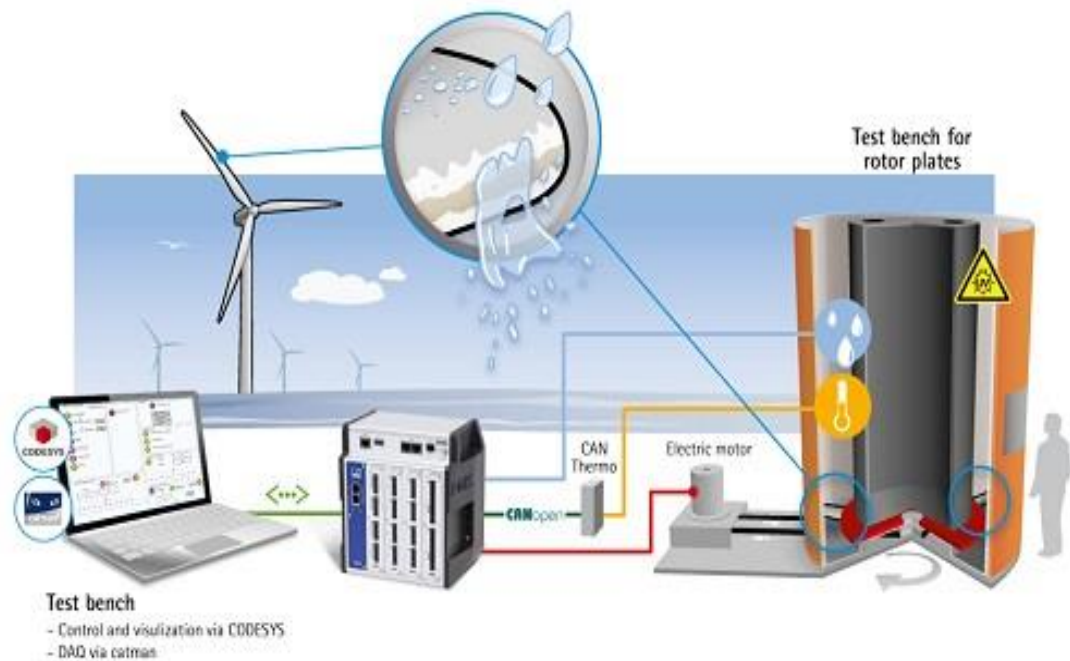
### 2.9.6. Controles.

Un sistema de control de la turbina eólica incluye los siguientes componentes:

- Sensores de velocidad, posición, flujo, temperatura, corriente, voltaje, etc.
- Controladores para mecanismos mecánicos, circuitos eléctricos y computadoras.
- Etapas de potencia como los conmutadores, amplificadores eléctricos, bombas hidráulicas y válvulas.
- Actuadores para los motores, pistones, los imanes, y solenoides

Todos estos componentes servirán para el mejoramiento de datos estadísticos y así podemos determinar mejoras en la turbina.

En muchos casos estos sistemas son implementados para ver el estado de las aspas y los demás elementos que se encuentran en intemperie están expuesto a los cambios climáticos. [Figura 20].



**Figura 20:** Sistema de control en un aerogenerador.

*Fuente: Control de un prototipo [20]*

## **CAPÍTULO 3**

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para el diseño del prototipo se implementaron métodos y técnicas de investigación, las cuales son:

#### **3.1. Método experimental.**

Dentro de la materia Centrales existen varias maneras de poder Generar energía eólica como:

Energía hidráulica, eólica, térmica, solar, nuclear, etc.

Enfocados en la energía eólica, identificamos que es fundamental que exista el estudio de la parte práctica y teórica de manera más profunda.

De manera que implementando la estructura (prototipo) para el generador, así podemos moldear el conocimiento y los conceptos teóricos impartidos en las aulas de la Universidad.

#### **3.2. Técnicas de investigación.**

Para obtener información necesaria se procedió a utilizar la técnica documental y la técnica experimental.

##### **3.2.1. Técnica documental.**

Esta técnica nos permite recopilar toda la información necesaria, así se procede a la revisión, selección y validez de los datos obtenidos en los libro, revistas, folletos, videos, etc.

##### **3.2.2. Técnica experimental.**

Mediante el anemómetro y durante un determinado tiempo se logró obtener datos acerca de la velocidad que circula en el sitio donde se instaló la estructura eólica. Posteriormente se hicieron pruebas para ver el sistema mecánico tanto a vacío como con carga.

### 3.3. Descripción de las pruebas de parámetros.

#### 3.3.1. Determinación de las condiciones ambientales.

Dentro de este prototipo se consideró el análisis de las condiciones ambientales que predominan en el correcto funcionamiento de un prototipo eólica las cuales son:

La velocidad del viento, temperatura, humedad, gradiente de presión, coriolis y rozamiento.

#### 3.3.2. La velocidad del viento.

Para poder entender la velocidad del viento debemos definir varios factores los cuales son:

La atmosfera, la densidad del aire seco, variaciones con la altura, la atmosfera estándar, circulación atmosférica (dirección).

#### 3.3.3. La atmosfera.

La atmosfera es la capa gaseosa que envuelve y preserva la vida en la tierra, esta es la capa que absorbe la radiación solar y disminuye las diferencias de temperatura.

#### 3.3.4. El aire seco.

El aire seco incluye cierto porcentaje de humedad o vapor de agua, esta actúa como una mezcla de gases ideales, a continuación en la Tabla 1 podemos observar las propiedades termodinámicas del aire seco.

Masa molecular (M) kg/Kmol	Constante del gas (R'=R/M) J/Kg K	Calores específicos (J/Kg K)	
		Presión cte. (Cp)	Volumen cte. (Cv)
		1004	716
28,96	287,04		

**Tabla 1:** Propiedades termodinámicas del aire seco. [1]

La densidad del aire seco se define de la siguiente ecuación [5]:

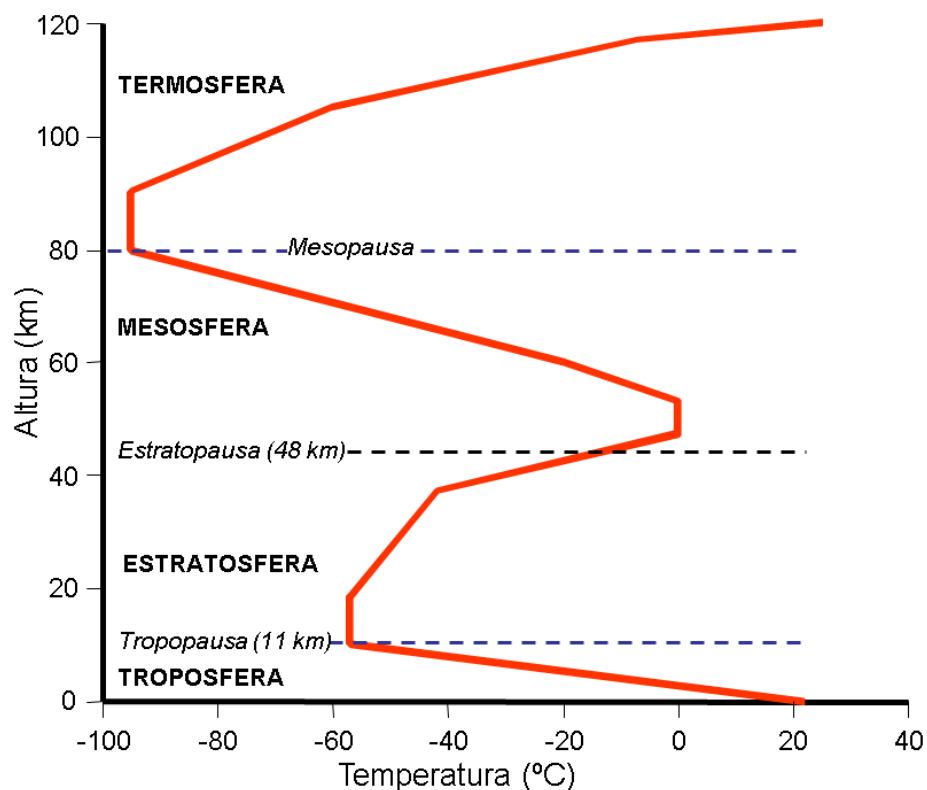
$$\rho = \frac{p}{R'T} \quad [5]$$

Donde,  $\rho$  es la densidad  $kg/m^3$ ;  $p$  la presión absoluta ( $Pa$ );  $T$  la temperatura ( $K$ ) y  $R'$  la constante del gas.

El aerogenerador capta la potencia del viento y esta es directamente proporcional a la densidad del aire, mediante esta definición se llega a la conclusión de que cuanto más frío este y mayor sea la presión atmosférica, para una misma velocidad de viento, la energía absorbida será mayor.

### 3.3.5. Estructura vertical de la atmosfera terrestre.

La atmosfera terrestre se divide verticalmente en capas según el gradiente de temperatura Tabla 2, como consecuencia la temperatura del aire varia con respecto a la altura [Figura 21].



**Figura 21:** Estructura vertical de la atmosfera terrestre.

*Fuente: Atmosfera terrestre [21]*

- **Troposfera:** tiene su partida desde la superficie terrestre escalando hasta la tropopausa la cual esta aproximadamente a unos 11 Km, según descienda la temperatura aumenta gradualmente.
- **Estratosfera:** inicia desde la Troposfera a unos 20 Km de altura, su temperatura oscila entre -60 a -40 °C.
- **Mesosfera:** alcanza los 80km de altura por encima de la estratosfera, la temperatura comienza a descender hasta unos -90 °C.

- **Termosfera:** en esta última capa la temperatura comienza a ascender debido a que recaen en el los rayos solares directos.

Capa	Altura (km)	Características del gradiente
Troposfera	0 – 10	$< 0$ estratificación adiabática
Tropopausa	10 – 20	$= 0$ estratificación isoterma
Estratosfera	20 – 40	$> 0$
Estratopausa	40 – 50	$= 0$
Mesosfera	50 – 80	$< 0$
Mesopausa	80 – 90	$= 0$
Termosfera	90 - 100	$> 0$

**Tabla 2:** Estructura atmosférica según el gradiente térmico. [1]

**Estratificación adiabática:** es cuando no se crean intercambios caloríficos entre el sistema interior y el exterior.

**Estratificación Isoterma:** es cuando la temperatura no varía a lo largo de la altura en este caso son las capas estratopausa y mesopausa.

### 3.3.6. La atmosfera estándar.

Se define una atmosfera estándar según se indica en la siguiente Tabla.

Podemos indicar que para obtener datos teóricos la temperatura y la presión son variables con respecto a la altura. Se podrá utilizar la ecuación de la Tabla 3 siempre y cuando nos encontremos dentro de la capa troposfera.



Aire seco % (volumen)	N <sub>2</sub> (78,04); O <sub>2</sub> (20,99); Ar (0,94); CO <sub>2</sub> (0,035)
Condiciones estándar (nivel del mar altura z=0 m)	p=1.013,25 mbar; t=15°C; $\rho=1,2257 \text{ Kg/m}^3$ ; R'=287,04 J/kg K
	Aceleración de la gravedad: $g=9,80665 \text{ m/s}^2$
	Coefficiente de dilatación del aire = $1/273 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$
Troposfera 0<z<11.000m	Temperatura t (°C): $t=15-0,0065 z$
	Presión p (mb): $p = 1013,25 \times (1 - 2,2569 \times 10^{-5} z)^{5,2561}$

**Tabla 3:** Características de la atmosfera estándar. [1]

### 3.3.7. Circulación atmosférica.

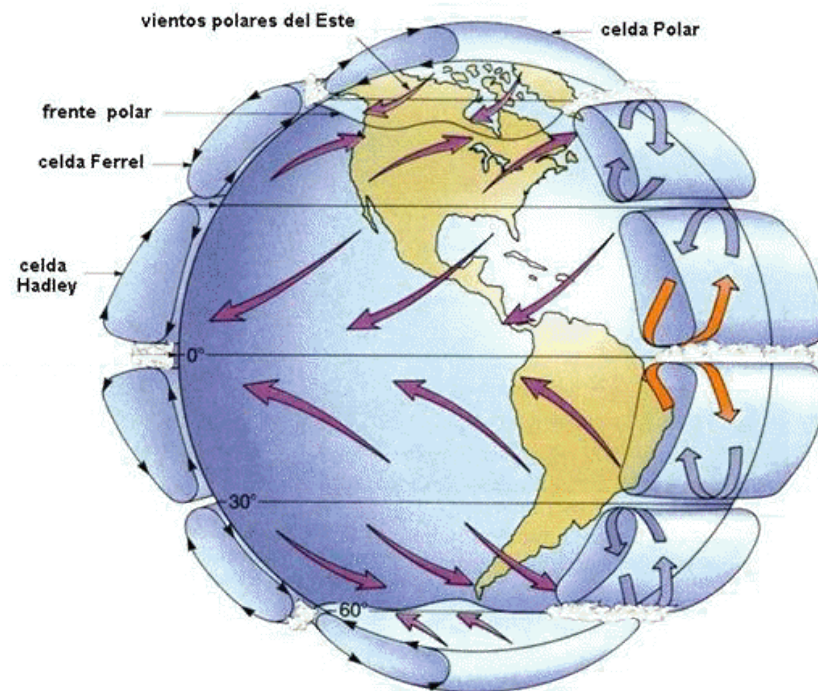
En la parte de la troposfera es donde generalmente existe movimiento del viento [Figura 22] y sobre el mismo influyen los siguientes factores:

La radiación solar, la rotación de la tierra y la acción sobre las masas de aire.

La radiación solar, es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol y la mayor cantidad de esta radiación cae en la zona ecuatorial.

La rotación de la tierra, que produce el efecto Coriolis, desviando la dirección de los vientos hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el sur.

La acción sobre las masas de aire de las diferencias de presión atmosférica, distintos tipos de superficies terrestres como continentes y mares.



**Figura 22:** Esquema de la dirección general del viento en la atmósfera.

*Fuente: pinterest [22]*

Existe una dominante en la dirección con respecto a la dirección del viento las cuales se resumen en la Tabla 4.

Intervalo de latitudes	90 – 60 °N	60 – 30 °N	30 – 0 °N	0 - 30 °S	30 – 60 °S	60 – 90 °S
Dirección dominante	NE	SO	NE	SE	NO	SE

**Tabla 4:** Direcciones de viento dominantes a escala del globo terrestre. [1]

### 3.3.8. La velocidad.

Es la velocidad con la que el aire de la atmósfera se mueve sobre la superficie terrestre.

A lo largo de tiempo se hicieron observaciones del efecto del viento y se llegaron a estimaciones de acuerdo a su velocidad, según la escala Beaufort Tabla 5 que a continuación se detalla:

Grados Beaufort	V(km/h)	V (m/s)	Descripción	Presión sobre superficie plana (N/m <sup>2</sup> )	
0	1	1	Calma	1,3	1 m/s
1	1 - 5	1 – 3	Brisa muy ligera	8	2,5 m/s
2	6 – 11	4 – 6	Brisa ligera	32	5 m/s
3	12 – 19	7 – 10	Pequeña brisa	64	7 m/s
4	20 - 28	11 - 16	Moderado	130	10 m/s

**Tabla 5:** Escala Beaufort de intensidades de viento. [1]

### 3.3.9. Temperatura.

Datos de la temperatura en el Ecuador obtenidas durante el año en grados Fahrenheit a continuación en la Tabla 6.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Alto	86	88	90	88	84	80	78	76	78	79	80	82
Baja	72	78	78	78	78	72	72	68	66	68	70	72

**Tabla 6:** Temperatura promedio por cada mes durante el año.

### 3.3.10. Datos promedios sobre la velocidad del viento.

Durante varios meses se recogió información sobre la velocidad del viento mediante un anemómetro.

A continuación la Tabla 7 donde la velocidad del viento esta expresada en metros/segundo:

Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Promedio (m/s)	3.4	2.9	2.86	3.2	2.9	4.1

**Tabla 7:** Velocidad promedio del viento durante 6 meses.

Fuente: Los autores

Estos son los datos promedios de la velocidad del viento, los cuales en el Anexo B se detallan por día y hora según el mes correspondiente.

### **3.3.4. Diseño de las palas.**

#### **3.3.4.1 Perfil aerodinámico.**

Se usa en las alas de los aviones, aspas de helicópteros, ventiladores y en turbinas eólicas las cuales están conformadas por las siguientes partes [Figura 23].

#### **3.3.4.2. Partes del perfil aerodinámico.**

##### **3.3.4.2.1. Cuerda.**

Longitud entre el borde de ataque y el borde de salida del perfil aerodinámico.

##### **3.3.4.2.2. Borde.**

Borde de ataque es la parte delantera del perfil aerodinámico, es la primera parte que toca la corriente de flujo de aire.

##### **3.3.4.2.3. Borde de salida.**

Es la parte trasera del perfil aerodinámico llamado también borde de fuga es el punto a partir del cual las corrientes de aire superior e inferior se unen.

##### **3.3.4.2.4. Extradós.**

También llamado Trasdós es la parte superior del perfil aerodinámico en el que la comba es más pronunciada o donde se genera la baja presión.

##### **3.3.4.2.5. Intradós.**

Parte inferior del perfil aerodinámico en el que la comba es menos pronunciada o donde se genera la alta presión.

##### **3.3.4.2.6. Línea de curvatura media.**

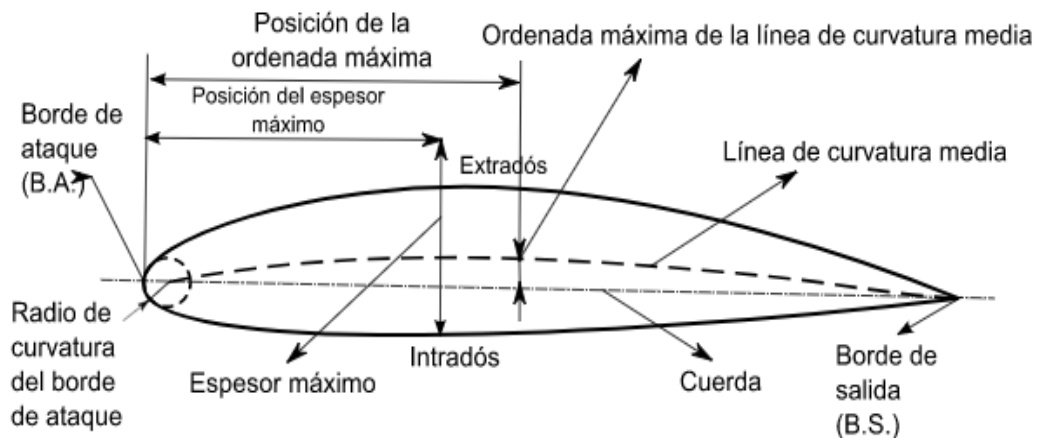
Es la división geométrica de las distancias, los centros de los trazos paralelos de toda la longitud de la cuerda generan una línea.

##### **3.3.4.2.7. Radio de curvatura.**

Es el radio donde inicia el borde de ataque.

##### **3.3.4.2.8. Espesor máximo.**

Es donde se encuentra lo más grueso del perfil aerodinámico.



**Figura 23:** Perfil aerodinámico de una pala.

*Fuente: Esacademic, s. f.) [23]*

El perfil aerodinámico implementado cumple los siguientes parámetros:

- a) Cuerda: 1.80 m.
- b) Borde: 0.30 m.
- c) Borde de salida: 0.10 m.
- d) Línea de curvatura media: 0.20 m.
- e) Radio de curvatura: 0.20 m.
- f) Espesor máximo: 0.15 m.

### 3.3.5. Funcionamiento del perfil aerodinámico.

En el funcionamiento del perfil aerodinámico encontramos que la velocidad es mayor sobre la cara superior del perfil y como de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, a mayor velocidad corresponde una menor presión, resulta que en la cara superior se genera una zona de baja presión que succiona al perfil hacia arriba. Correspondientemente, en la cara inferior, donde las partículas del aire se mueven a menor velocidad, se desarrolla una sobrepresión con respecto a la corriente libre que también empuja al perfil en forma ascendente. La integración de las presiones ejercidas sobre el perfil da como resultado una fuerza resultante denominada fuerza de presión.

Existen dos tipos de presiones que son:

Presión estática hace referencia a la presión generada por el fluido estático y depende del peso específico y de la altura del nivel del fluido. Cuantos mayores sean los valores de estos dos factores, mayor será la presión estática que se ejercerá. Se expresa con  $P_e$ . [Figura 23].

Presión dinámica es la que se origina como consecuencia de la velocidad a la que circula el fluido por la pala. Se expresa con Pd. [Figura 23]

A la Fuerza ejercida sobre las aspas la llamaremos Fuerza de arrastre la cual está dada por la siguiente [Ecuación 6]:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad [6]$$

Donde,

- a)  $F_D = \text{Fuerza de arrastre}$
- b)  $\rho = \text{densidad del aire}$
- c)  $V = \text{Velocidad}$
- d)  $C_D = \text{Coeficiente de arrastre}$
- e)  $A = \text{Área}$

Para la densidad del aire procedemos a utilizar la formula de la [Ecuacion 7] la cual indica que:

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{p \text{ (Pa)}}{R' \text{ (J/kg.K)} * T \text{ (K)}} \quad [7]$$

Para hallar  $\rho$  la densidad  $\text{kg/m}^3$ ; tenemos que la presión absoluta es igual a  $1009.65 \text{ mPa}$  es constante debido a que nos encontramos en la capa Troposfera; la temperatura es  $28.35(^{\circ}\text{C})$  y  $R'$  la constante del gas  $287.04 \text{ (J/kg.K)}$ .

- a)  $1 \text{ mbar} = 1 \text{ hPa}$
- b)  $1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$
- c)  $1009.65 \text{ hPa} = 1009.65 \text{ Pa}$
- d)  $T = 28.35^{\circ}\text{C} + 273.15 = 301.35 \text{ K}$
- e)  $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{1009.65 \text{ (Pa)}}{287.04 \text{ (J/kg.K)} * 301.35 \text{ (K)}}$
- f)  $\rho = 1.06 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

Para determinar el coeficiente de arrastre tenemos, como nos indica [24]: “National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) - Consejo Nacional para la Aeronáutica es una agencia federal de Estados Unidos fundada el 3 de marzo de 1915 para emprender, fomentar e institucionalizar las investigaciones aeronáuticas. El 1 de octubre de 1958 se disolvió la agencia y sus recursos y personal formaron el núcleo de la recién creada NASA (National Aeronautics and Space Administration: Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio).”

Dentro de sus investigaciones obtenemos una base de datos la cual nos brinda varios tipos de perfiles aerodinámicos (Airfoil) los cuales los podemos encontrar en la página [Airfoiltools.com](http://Airfoiltools.com).

En la [Figura 24 y 25] podemos observar los ángulos que actúan, en nuestras aspas tenemos que el ángulo de ataque cuando está en  $5^\circ$  tiene un coeficiente de arrastre de 0.06.

- a)  $C_D = 0.06$
- b)  $\alpha = 5^\circ$
- c)  $F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A$
- d)  $F_D = \frac{1}{2} * 1.06 * 3.10^2 * 0.06 * \pi * 2^2$
- e)  $F_D = 3.84$

Dónde:

$C_D$  = Coeficiente de arrastre

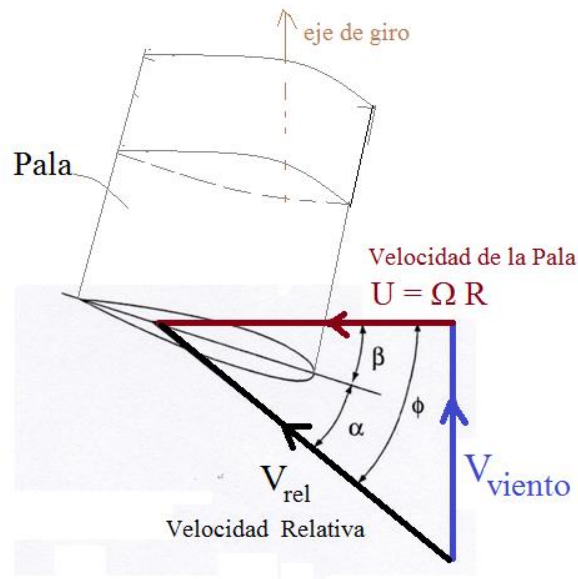
$\alpha$  = Ángulo de ataque

$F_D$  = Fuerza de arrastre

$V$  = Velocidad

$\rho$  = Densidad

$A$  = Área



**Figura 24:** Ángulos que actúan en un perfil aerodinámico.

*Fuente: TEC Ecuador [25]*

Dónde:

$V_{viento}$ : Velocidad del viento. A la altura del rotor, para un observador fijo (en tierra).

$U$ : Velocidad de giro de la pala.

$V_{rel}$ : Velocidad del viento para un observador que estuviera girando con la pala, es igual a la suma vectorial de las otras dos y des luego a la [Ecuación 8]:

$$V_{rel} = \sqrt{V_{viento}^2 + U^2} \quad [8]$$

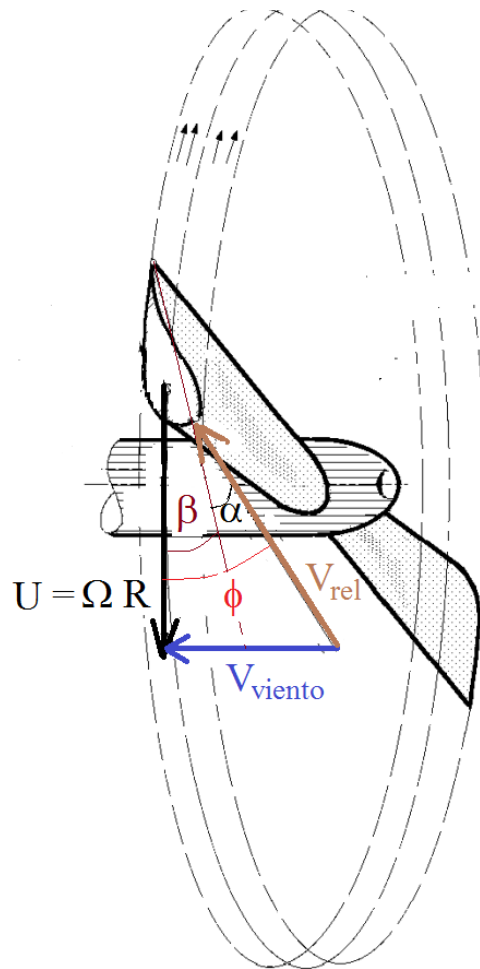
$\beta$ : Ángulo de calaje, puramente geométrico, es decir, solo depende de la pala, sino la torcemos, este ángulo será el mismo para toda la pala.

$\alpha$ : Ángulo de ataque es que se encuentra entre la cuerda y la velocidad relativa.

$\phi$ : Ángulo entre el plano de rotación y la velocidad relativa

$\phi: \alpha + \beta$





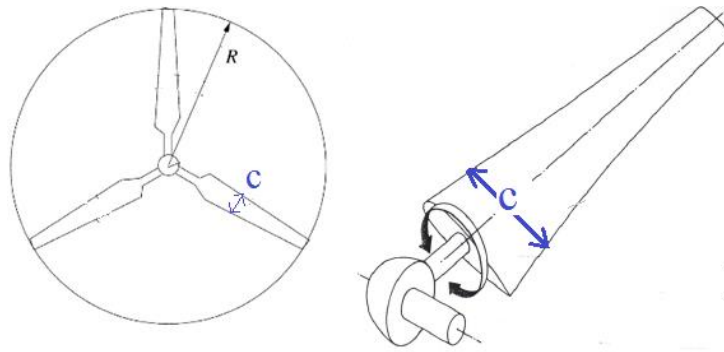
**Figura 25:** Ángulos que actúan en un perfil aerodinámico.

*Fuente: TEC Ecuador [25]*

Dentro de las condiciones que presenta en nuestro proyecto tenemos:

- a)  $V_{viento}$ : 3.10m/s
- b)  $\Omega$ = 20 rpm
- c) R: 2 m
- d)  $\beta$ =5°

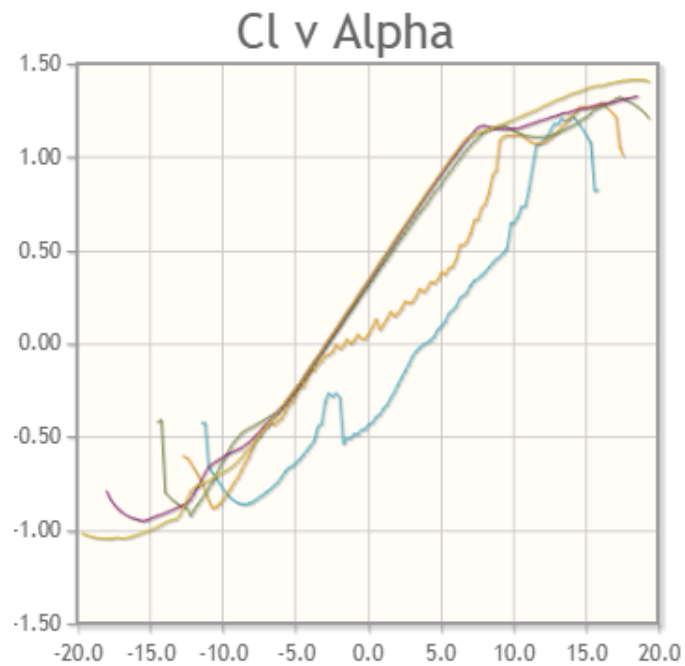
Si, la cuerda (c) [Figura 26] es constante en todo el rotor e igual a 0.25 m.



**Figura 26:** Dimensión de la cuerda (c).

*Fuente: TEC Ecuador [25]*

Y de acuerdo a la gráfica de la [Figura 27]  $\alpha=10.33^\circ$ , entonces  $C_l=1.1$  aproximadamente



**Figura 27:** Cl vs Alpha.

*Fuente: Airfoiltools NACA [26]*

Partimos de la definición de coeficiente de sustentación y de ahí despejamos la fuerza de sustentación (no motriz) [Ecuación 9].

$$F_l = (0.5\rho AV_{rel}^2)C_l \quad [9]$$

Dónde:

$$a) \quad V_{rel} = \sqrt{V_{viento}^2 + U^2}$$

$$b) \quad V_{rel} = \sqrt{(3.10 \text{ m/s})^2 + (4.19 \text{ m/s})^2} = 5.21 \text{ m/s}$$

Recordar que para el ejercicio se considera que  $C_l$  no cambia en el transcurso de la pala.

$$c) \quad A = cR = (0.25\text{m})(2\text{m}) = 0.5 \text{ m}^2$$

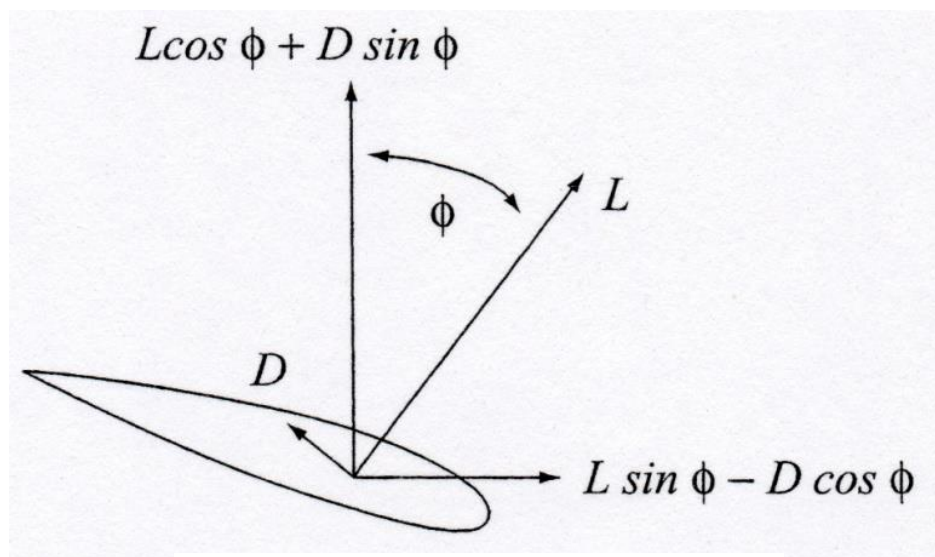
Sustituyendo obtenemos la fuerza de sustentación.

$$d) \quad F_l = (0.5\rho AV_{rel}^2) * C_l$$

$$e) \quad F_l = (0.5)(1.06)(0.5)(5.21^2) * 1.1$$

$$f) \quad F_l = 7.91 \text{ N}$$

Sin embargo no toda la fuerza de sustentación sirve para mover la pala, la sustentación es perpendicular al viento relativo, por lo tanto, como puede verse en la [Figura 28] y despreciando la fuerza de arrastre  $D=0$  [Ecuación 10].



**Figura 28:** Fuerza de sustentación.

**Fuente:** TEC Ecuador [25]

Por lo tanto,

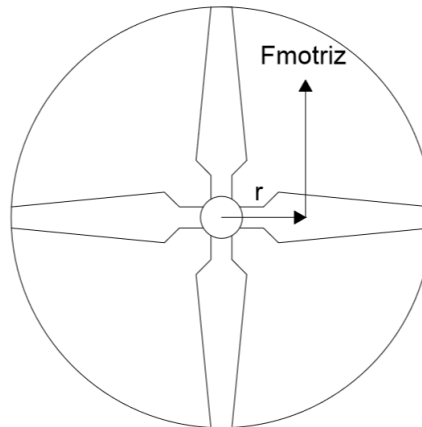
$$F_{motriz} = F_l \cos \phi \quad [10]$$

a)  $F_{motriz} = 7.91 \text{ N} \cos 5.33^\circ$

b)  $F_{motriz} = 4.58 \text{ N}$

Par poder calcular el torque y la potencia usamos las siguientes ecuaciones clásicas de la mecánica [Ecuación 11].

Nuestro prototipo posee 4 palas por lo tanto el torque total sobre el rotor será cuatro veces el torque producido por una sola pala. Por otro lado estamos suponiendo que la fuerza motriz se está aplicando a la mitad de la pala como se muestra en la [Figura 29].



**Figura 29:** Fuerza Motriz.

**Fuente:** Los autores

$$\tau = 4 \left( \frac{R}{2} \right) F_{motriz} \quad [11]$$

a)  $\tau = 4(1) * 4.58$

b)  $\tau = 18.32 \text{ N.m}$

La potencia en el centro de la pala es igual a la siguiente [Ecuación 12]:

$$P = \Omega * \text{Torque} \quad [12]$$

Donde, la velocidad de giro es 20 rpm, es decir 2.09 rad/s.

- a)  $\Omega = 20 \text{ rpm}$ .
- b)  $P = 2.09 * 18.32$
- c)  $P = 38.29 \text{ W}$

Definimos que mientras menos palas exista menor será el torque y menor será la potencia adquirida en un punto de la pala. Según los cálculos realizados tenemos que la potencia máxima de nuestro prototipo es de 38.29 W.

La velocidad relativa influye en la potencia y en el torque, por lo tanto necesitamos que el viento fluya en toda la cuerda de las aspas, por lo tanto, se debe torcerla en toda la longitud.

### **3.3.6. Diseño del sistema de transmisión.**

El sistema de transmisión es el conjunto de elementos mecánicos que cumplen una función específica hacer llegar el giro correspondiente a una carga final teniendo la facultad de variar la relación de transmisión en función de lo requerido.

El sistema de transmisión de nuestro prototipo está conformado por diferentes elementos mecánicos que detallamos a continuación:

- a) Diferenciales
- b) Ejes de transmisión
- c) Chumaceras
- d) Cojinetes
- e) Piñón
- f) Cadena
- g) Poleas
- h) Bandas o correa de transmisión
- i) Acoplamiento elásticos

#### **3.3.6.1 Diferencial mecánico.**

Un diferencial está conformado por la corona que impulsa los engranes del diferencial, esta corona gira a menos velocidad que el piñón, sus satélites giran en conjunto con la corona y el engrane lateral del diferencial está conectado con el eje resultante. El piñón transmite la potencia mecánica a la corona. La importancia del diferencial en nuestro prototipo radica en que el generador debe ir instalado en la parte inferior para que los estudiantes puedan ver el funcionamiento mecánico del mismo.

Tenemos dos diferenciales, superior e inferior. [Figura 30].



**Figura 30:** Diferenciales mecánicos superior e inferior.

*Fuente: Los autores*

### 3.3.6.2 Eje de transmisión.

Se conoce como eje de transmisión a todo objeto asimétrico especialmente diseñado para transmitir potencia [Figura 31]. Estos elementos de máquinas constituyen una parte fundamental de las transmisiones mecánicas y son ampliamente utilizados en una gran diversidad de máquinas debido a su relativa simplicidad [27].



**Figura 31:** Eje de transmisión.

*Fuente: Sistecom [28]*

### 3.3.6.3 Chumacera.

Es un elemento mecánico de metal el cual permite descansar y girar un eje de transmisión por medio de un cojinete interno el cual esta lubricado. [Figura 32].

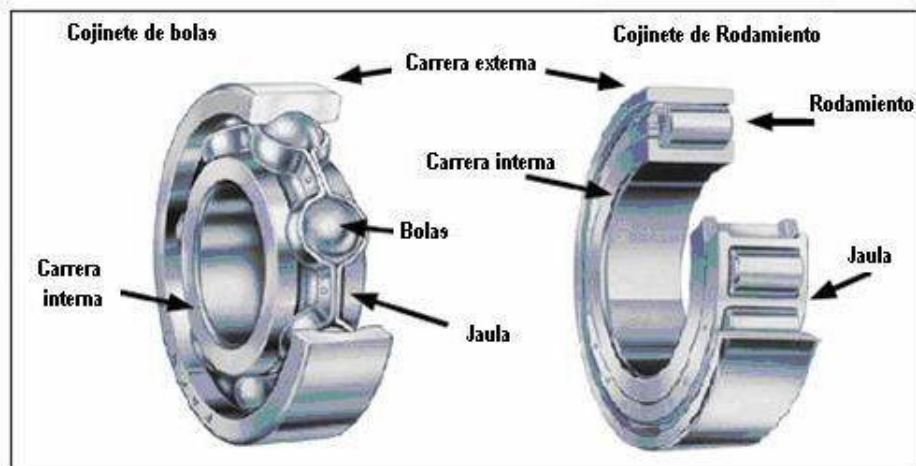


**Figura 32:** Chumacera.

*Fuente: Casa del Rulimán [29]*

### 3.3.6.4 Cojinetes.

Se denomina cojinete a una pieza o conjunto de piezas [Figura 33] que soportan el giro del eje de una máquina. En definitiva, el cojinete permite el movimiento del eje en su interior, soportando los momentos que se puedan producir. [30]



**Figura 33:** Partes internas y externas de un cojinete.

*Fuente: mecanismos1bach [31]*

### 3.3.6.5 Piñón.

Es una rueda dentada la cual está fijada, permite la transmisión mecánica debido al movimiento ejercido por la cadena [Figura 34].



**Figura 34:** Piñón mecánico.

*Fuente: Piñón [32]*

### 3.3.6.5 Cadena de transmisión.

Una cadena de transmisión sirve para transmitir del movimiento de arrastre de fuerza entre ruedas dentadas [Figura 35] [33].



**Figura 35:** Cadena de transmisión.

*Fuente: Indiamar [34]*



### 3.3.6.6 Poleas.

Es un elemento redondo el cual tiene un orificio central para fijación, y un canal de tracción que sirve para transmitir una fuerza [Figura 36], tiene un perno para apretar el eje que va en el centro del mismo.



**Figura 36:** Polea en aluminio reforzada.

*Fuente: Polmangueras [35]*

### 3.3.6.7 Banda de transmisión.

La banda es un elemento que sirve para el traslado de la energía en forma rotacional esto se debe a que es utilizado por poleas, debido a que actúan con las fuerzas de fricción, algo parecido a las cadenas, correas, etc. [Figura 37].



**Figura 37:** Banda de transmisión.

*Fuente: Nijeva [36]*

### 3.3.6.8 Acoplamiento elástico.

Este elemento absorbe y amortigua las irregularidades del par, desplaza los regímenes críticos, acepta desalineaciones y diferencias entre los ejes [Figura 38], suprime las posibles tensiones de un acoplamiento rígido en las mismas condiciones, permite una construcción más ligera, con tolerancias mayores. [37]



**Figura 38:** Acoplamiento elástico entre los dos ejes.

*Fuente: Los autores*

### 3.3.7. Funcionamiento del sistema de transmisión.

El sistema de transmisión presenta tres etapas:

- Etapa 1. Superior

En la parte superior se acopla una torta de aproximadamente 8" de diámetro la cual lleva perforaciones para poder fijar las aspas, luego encontramos un soporte el cual está compuesto por dos láminas de hierro negro de  $\frac{1}{4}$ " de espesor dando una forma de "L" con una longitud de 25 cm, a su vez se instala una chumacera la cual soporta el eje de transmisión que va desde las aspas hacia el primer diferencial [Figura 39].



**Figura 39:** Eje transmisión horizontal compuesto por un diferencial, un soporte en L, una chumacera y una torta de sujeción para las palas.

*Fuente: Los autores*

El engrane lateral del diferencial está conectado con el eje resultante, internamente se diseñaron dos circunferencias de  $\frac{5}{8}$ " de espesor con un radio de 3" aproximadamente en su centro se hicieron cortes para adaptar dos cojinetes del mismo diámetro del eje principal de  $1\frac{1}{2}$ " para que no sufra desgaste ni pérdidas mecánicas. Estas circunferencias están soldadas para dar firmeza al eje [Figura 40].



**Figura 40:** Tortas con sus cojinetes.

*Fuente: Los autores*

En la parte exterior en la cubierta se encuentran dos puertas pequeñas a nivel de la circunferencia con el cojinete el cual permitirá lubricar y dar mantenimiento a los mismos. [Figura 41]



**Figura 41:** Compartimentos para mantenimiento de cojinetes.

*Fuente: Los autores*

La veleta está compuesta de balsa dentro de la misma se instaló un tubo de 30 cm de largo y 3.5 cm de diámetro. La veleta de dimensiones 84.5 cm de ancho y alto 60.5 de espesor 4 cm. [Figura 42]

Esta veleta proporciona un peso considerable ya que esta hará el contrapeso de la parte frontal que conforman las palas.

Posicionada en forma vertical esto permite que gire 360 grados una vez que el viento golpee su área.



**Figura 42:** Veleta en forma vertical para dar dirección a las aspas.

*Fuente: Los autores*

- Etapa 2. Inferior

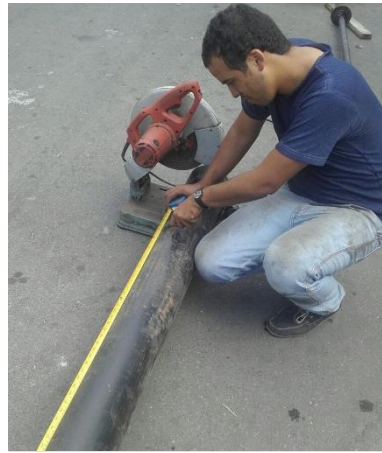
En la parte inferior se encuentra el segundo diferencial este captura el movimiento del eje vertical convirtiéndolo en movimiento horizontal, también se instaló una plancha de hierro negro con un espesor de  $\frac{1}{2}$ " con dimensiones aproximadas de largo 51.50 cm y de ancho 45 cm, en cada esquina se perforaron circunferencias de  $\frac{5}{8}$ " para fijar la estructura con pernos expansibles acerados, además se soldaron dos argollas en las cuales se instalaran tensores estos irán fijados hacia el suelo. [Figura 43], además en cada perforación hacia el piso se colocó un impermeabilizante para que no filtrara el agua hacia las aulas, se instaló la estructura en medio de una correa que está sujeta a un pilar para dar mayor seguridad.



**Figura 43:** Fijación con tensores.

*Fuente: Los autores*

La cubierta exterior está compuesta por un tubo de hierro negro con un espesor de  $\frac{1}{4}$ " con una longitud de 3.10 m con un diámetro de 6" el cual recubre al eje vertical. [Figura 44]



**Figura 44:** Cubierta exterior.

*Fuente: Los autores*

La cubierta exterior contiene en la parte inferior cuatro bases las cuales dan firmeza y resistencia al peso de la estructura [Figura 45] con dimensiones de 52 cm de alto y 13 de ancho elaborada con una plancha de  $\frac{3}{4}$ " de espesor de material hierro negro.



**Figura 45:** Soporte para cubierta exterior.

*Fuente: Los autores*

- Etapa 3. Generación

Para la generación debemos considerar que el trayecto que recorre nuestro sistema de transmisión tiene pérdidas los cuales deben ser compensados, para aquello instalamos una caja elevadora de velocidades.

Debemos considerar que para la caja debemos tener un mismo alineamiento para que a su vez los elementos mecánicos que se incorporan, no sufran desgastes ni pérdida en la potencia final.

Esta caja está compuesta por chumaceras, engranes, cadena, poleas, bandas, acoplamiento elástico. [Figura 46]

Para mantener un mismo nivel se fabricaron pequeñas bases para poder empernar las chumaceras. Esta caja tiene una relación de 1:6, se instaló un engrane con una cadena debido al torque que se genera al momento de que las aspas se muevan, ya que la banda se desliza al momento de un torque grande.

De igual forma se dejó instalado el generador el cual está sujeto al eje de transmisión por un acople elástico el cual absorbe cualquier desalineamiento o movimiento no adecuado.



**Figura 46:** Caja elevadora de velocidades con el Generador de imanes permanentes.

*Fuente: Los autores*



## CAPÍTULO 4

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas experimentales fueron realizadas durante varios meses en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana bloque E.

#### 4.1. Mediciones del viento

Para poder determinar las pruebas a vacíos es necesario tener una velocidad de viento considerable, y para aquello es necesario tener un instrumento medición como un Anemómetro el cual toma lectura de la velocidad del viento, la temperatura y la humedad. [Figura 47].



**Figura 47:** Anemómetro instrumento de medición del viento.

*Fuente: Los autores*

En la UPS existen varios bloques o edificios, se escogió el bloque E debido a que es el edificio más alto y está cerca del río Guayas, de esa manera no tenemos obstáculos para poder adquirir la energía cinética, durante seis meses se realizaron mediciones del viento teniendo ráfagas promedios de 3.10 m/s, en algunos momentos con ráfagas de hasta 8m/s y una mínima de 1.8 m/s, tomando en consideración que tenemos una altura aproximada de 30 m.

## 4.2. Prueba a vacío

Posteriormente se hicieron lecturas de las revoluciones en los ejes de transmisión con el instrumento de medición llamado Tacómetro, los cuales se detallan en la [Tabla 8].

Medición de revoluciones en sistema de transmisión			
Velocidad del viento aproximado [m/s]	Eje horizontal [r.p.m.]	Eje vertical [r.p.m.]	Eje del generador a vacío [r.p.m.]
1	3.00	0.76	24.3
2	6.00	1.49	47.66
3	7.30	1.84	58.78
4	12.40	3.10	99.12
5	18.60	4.66	148.97

**Tabla 8:** Mediciones obtenidas por el tacómetro.

Fuente: Los autores

Los datos que se visualizan en la Tabla 8 nos indican que tenemos velocidades que inician desde 1 m/s y hasta 5 m/s con un promedio de consistencia de 20 segundos, lo que quiere decir que en 20 segundos aproximadamente se mantienen las velocidades.

Dividimos nuestra tabla en tres etapas debido a que la transmisión no es continua, y tiene cambios de posición en el transcurso de la misma.

Etapas 1 (Eje horizontal), definimos a esta etapa como la inicial la adquisición de la energía cinética mediante las aspas nos permite tener un impulso de fuerza en el eje el cual está adaptado con un círculo de 8 1/2", este círculo tiene perforaciones uniformes y equilibradas en cada ángulo divididos en 4 partes, la energía mecánica que actúa sobre el eje horizontal inicia desde 3.13 rpm hasta 18.79 rpm.

La cual obtenemos los números de revoluciones por minuto de la siguiente ecuación 13.

$$n = \frac{v}{d * \pi} \quad [13]$$

Donde,

n: revoluciones por minuto.

v: velocidad dado en metros/segundos

d: diámetro de la herramienta dado en metros

Para la etapa 2 (eje vertical), nos encontramos con un diferencial el cual transforma la posición del eje de transmisión de forma horizontal a vertical, así obtenemos una relación de pérdida 2:1.



Para la etapa 3 (eje del generador) nos encontramos con el segundo diferencial, el cual disminuye la velocidad, así mismo a la salida tenemos una caja amplificadora de velocidad la cual está compuesta por tres etapas que incrementan la velocidad y tiene una relación de 1:4.

La caja amplificadora está compuesta por poleas, chumaceras, cadenas, bandas, piñón, etc.

Para amplificar la velocidad se utiliza la siguiente ecuación 14:

$$d1 * n1 = d2 * n2 \quad [14]$$

Tenemos como resultado las siguientes Tablas experimentales.

<b>Primera etapa de amplificación</b>				
Velocidad del viento aproximado [m/s]	D1 [m]	N1 [rpm]	D2 [m]	N2 [rpm]
1	0.2032	0.38	0.0508	1.52
2	0.2032	0.74	0.0508	2.98
3	0.2032	0.92	0.0508	3.67
4	0.2032	1.55	0.0508	6.20
5	0.2032	2.33	0.0508	9.31

**Tabla 9.** Primera amplificación.

Fuente: Los autores

<b>Segunda etapa de amplificación</b>				
Velocidad del viento aproximado [m/s]	D1 [m]	N1 [rpm]	D2 [m]	N2 [rpm]
1	0.2032	1.52	0.0508	6.08
2	0.2032	2.98	0.0508	11.92
3	0.2032	3.67	0.0508	14.70
4	0.2032	6.20	0.0508	24.78
5	0.2032	9.31	0.0508	37.24

**Tabla 10.** Segunda amplificación.

Fuente: Los autores

Tercera etapa de amplificación				
Velocidad del viento aproximado [m/s]	D1 [m]	N1 [rpm]	D2 [m]	N2 [rpm]
1	0.2032	6.08	0.0508	24.30
2	0.2032	11.92	0.0508	47.66
3	0.2032	14.70	0.0508	58.78
4	0.2032	24.78	0.0508	99.12
5	0.2032	37.24	0.0508	148.97

**Tabla 11.** Tercera amplificación.

Fuente: Los autores

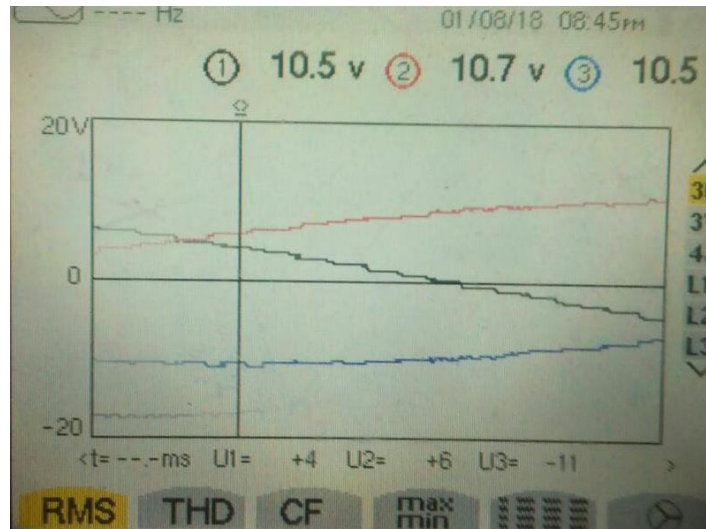
### 4.3. Prueba con generador

Mediante un analizador de redes Fluke 430 [Figura 48] se procede a la adquisición de datos, el cual fue instalado en la salida del Generador de imanes permanentes teniendo como resultado la siguiente Tabla 12.



**Figura 48:** Analizador de redes Fluke 430.

*Fuente: Fluke 430 [38]*



**Figura 49:** Datos adquiridos con un Analizador de redes.

*Fuente: Los autores*

En la [Figura 49] podemos observar el comportamiento de la energía ya posesionada en el generador teniendo como resultado 10voltios con una velocidad aproximada de 5 m/s.

<b>DATOS OBTENIDOS DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES A VACIO</b>				
VIENTO PROMEDIO [m/s]	TENSION FASE (R) [V]	TENSION FASE (S) [V]	TENSION FASE (T) [V]	TENSION NEUTRO (N) [V]
0	0	0	0	0
1	1.85	1.83	1.85	1.07
2	3.68	3.66	3.67	2.12
3	5.80	5.80	5.78	3.34
4	7.35	7.37	7.36	4.25
5	11.12	11.11	11.11	6.43

**Tabla 12:** Tabla de resultados experimentales.

Fuente: Los autores

## CAPÍTULO 5

### 5. CONCLUSIONES

La fabricación del prototipo es realizado, su mayoría con material en hierro negro y en acero inoxidable la parte que está expuesta a lluvias y fuerte rayos solares, se utilizaron materiales reciclables para preservar el medio ambiente.

Las aspas deben tener alineamiento y un mismo peso para equilibrar cargas en los cuatro sentidos.

El generador de imanes permanentes tiene la capacidad de generar 226 W, el prototipo eólico tiene la capacidad de generar 30 W, teniendo una eficiencia del 13%, nuestro prototipo fue diseñado para el estudio y análisis del funcionamiento de una turbina eólica de eje horizontal, y para el aprendizaje, el generador está en la parte inferior por tal motivo encontramos perdidas mecánicas en el trayecto del sistema de transmisión, es importante resaltar que el viento no es constante y no actúa en una sola dirección, por lo tanto la eficiencia final varía, además geográficamente estamos al nivel del mar por estas razones el prototipo es instructivo.



**Figura 50:** Prototipo instalado en el Bloque E cerca del rio Guayas.

*Fuente: Los autores*

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda que las aspas sean de material sólido y compacto, no dejar aberturas en ellas, ya que se tiene que evitar filtraciones dentro de aquella.

Todo sistema de transmisión debe tener un alineamiento para evitar desgaste y perdidas mecánicas.

Al momento de acercarse, tener precaución ya que las aspas podrían golpear, se recomienda fijarla hacia un sentido.

Dar visitas y supervisión semestrales, verificar que los rodamientos tengan suficiente lubricación, en la estructura encontramos dos puertas, al abrirlas encontramos los cojinetes principales, posteriormente verificar la caja de velocidades y dar mantenimiento a las chumaceras.

## REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

### Bibliografía

- [1] M. V. López, Ingeniería de la Energía Eólica, Primer ed., A. G. Editor, Ed., México: Alfaomega Grupo Editor, 2013, p. 284.
- [2] Ramírez y Saavedra-Montes, «Parameter calculation of a small wind turbine model c #x00E1;lcuulo de par #x00E1;metros del modelo de una turbina e #x00F3;lica (160 w),» de *2012 IEEE 4th Colombian Workshop on Circuits and Systems (CWCAS)*, November 2012.
- [3] GoogleMaps, «GoogleMaps,» [En línea]. Available: [https://www.google.com.ec/search?dcr=0&tbm=lcl&ei=JY0LWs7WNYuWmQGApbqIAg&q=universidad+salesiana+de+guayaquil&oq=universidad+salesiana+de+guayaquil&gs\\_l=psy-ab.3...0.0.0.137957.0.0.0.0.0.0.0.0....0...1..64.psy-ab..0.0.0....0.Qba1gjcGDdo#rlfi=hd::si:1](https://www.google.com.ec/search?dcr=0&tbm=lcl&ei=JY0LWs7WNYuWmQGApbqIAg&q=universidad+salesiana+de+guayaquil&oq=universidad+salesiana+de+guayaquil&gs_l=psy-ab.3...0.0.0.137957.0.0.0.0.0.0.0.0....0...1..64.psy-ab..0.0.0....0.Qba1gjcGDdo#rlfi=hd::si:1).
- [4] T. b. MyThemeShop, «Tipos de energías renovables: Cuadros comparativos | Cuadro Comparativo,» [En línea]. Available: <https://cuadrocomparativo.org/tipos-de-energias-renovables-cuadros-comparativos/>.
- [5] C. ISM, «Jornada Técnica: ‘Tecnologías de monitoreo para la reducción de la mortalidad de aves en parques eólicos’,» [En línea]. Available: <http://www.comunidadism.es/agenda/jornada-tecnica-tecnologias-de-monitoreo-para-la-reduccion-de-la-mortalidad-de-aves-en-parques-eolicos>.
- [6] J. Rubén, « Aero generación de energía; Olade,» 1983. [En línea].
- [7] Ecatepec, «Anemometro MS6252A\* Flujo de Aire, Tpm Equipos,S.A. De C.V.,» [En línea]. Available: <http://tpmequipos.com/anemometro-ms6252a-flujo-de-aire.html>.
- [8] CEMAER, «Energía Eólica – Tipos De Turbinas De Viento,» [En línea]. Available: <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2015/01/08/energia-eolica-tipos-de-turbinas-de-viento/>.
- [9] Energiaestrategica, «Evolucion-del-tamano-de-las-turbinas-eolicas,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Diego\\_Roger2/publication/312304898/figure/fig26/AS:450136028520454@1484332200328/Figura-2-23-Evolucion-del-tamano-de-las-turbinas-eolicas-desde-1980-y-prospectiva.png](https://www.researchgate.net/profile/Diego_Roger2/publication/312304898/figure/fig26/AS:450136028520454@1484332200328/Figura-2-23-Evolucion-del-tamano-de-las-turbinas-eolicas-desde-1980-y-prospectiva.png).
- [10] Energiaestrategica, «Potencia instalada,» [En línea]. Available: <http://www.energiaestrategica.com/wp-content/uploads/2014/09/2.jpg>.

- [11] P. E. Escocia, «Parque Eolico Escocia,» [En línea]. Available:  
[http://4.bp.blogspot.com/-  
x4LUgIvcD4M/U\\_X6JA7pHyI/AAAAAAAAARAs/UU424OKTKy8/s1600  
/UK%2Bwind%2Benergy.jpg](http://4.bp.blogspot.com/-x4LUgIvcD4M/U_X6JA7pHyI/AAAAAAAAARAs/UU424OKTKy8/s1600/UK%2Bwind%2Benergy.jpg).
- [12] L. Array, «London Array,» [En línea]. Available: [https://www.evwind.com/wp-  
content/uploads/2013/07/London-Array.jpg](https://www.evwind.com/wp-content/uploads/2013/07/London-Array.jpg).
- [13] Villonaco, «Parque Eolico Villonaco,» [En línea]. Available:  
<http://www.energia.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/Villonaco.png>.
- [14] MI&T, «Windfloat,» [En línea]. Available:  
[https://ingenieriaenlared.wordpress.com/2008/10/12/windfloat-  
aerogenerador-offshore-flotante-de-mit/](https://ingenieriaenlared.wordpress.com/2008/10/12/windfloat-aerogenerador-offshore-flotante-de-mit/).
- [15] P. d. fibra, «Palas de fibra,» [En línea]. Available:  
[http://www.galeon.com/aerogeneradorescratch/aerogen\\_imagenes/palas\\_de  
\\_fibra.JPG](http://www.galeon.com/aerogeneradorescratch/aerogen_imagenes/palas_de_fibra.JPG).
- [16] Narón, «Sincro Mecanica,» [En línea]. Available:  
[http://www.sincromecanica.es/4.0\\_servicios.php?op=3](http://www.sincromecanica.es/4.0_servicios.php?op=3).
- [17] O. Garcia, «Generador de imanes permanentes,» [En línea]. Available:  
[https://www.google.com.ec/search?q=generadores+de+imanes+permanent  
es&dcr=0&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj-  
7pnKtoHaAhVCuVMKHZb8BRMQ\\_AUICigB&biw=1366&bih=662#im  
grc=NpZfU\\_prhrgUFM:.](https://www.google.com.ec/search?q=generadores+de+imanes+permanent+es&dcr=0&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj-7pnKtoHaAhVCuVMKHZb8BRMQ_AUICigB&biw=1366&bih=662#imgrc=NpZfU_prhrgUFM:.)
- [18] Alibaba, «Venta al por mayor veleta de viento,» [En línea]. Available:  
[https://www.google.com.ec/search?dcr=0&biw=1366&bih=662&tbm=isch  
&sa=1&ei=vWq0WuK6EITCzwL6rIOYAw&q=veleta+de+viento&oq=ve  
leta+&gs\\_l=psy-  
ab.1.1.0l10.5522.10952.0.13371.15.11.0.0.0.0.215.1224.0j7j1.8.0....0...1c.  
1.64.psy-ab..8.7.1120...0i67k1.0.j1LojFpCMvM#i](https://www.google.com.ec/search?dcr=0&biw=1366&bih=662&tbm=isch&sa=1&ei=vWq0WuK6EITCzwL6rIOYAw&q=veleta+de+viento&oq=veleta+&gs_l=psy-ab.1.1.0l10.5522.10952.0.13371.15.11.0.0.0.0.215.1224.0j7j1.8.0....0...1c.1.64.psy-ab..8.7.1120...0i67k1.0.j1LojFpCMvM#i).
- [19] diariolasnoticias, «Primer torre de energai eolica Rioja Argentina,» [En línea]. Available:  
[http://diariolasnoticias.com.ar/mostrarnoticia1.php?id\\_noticia=22585](http://diariolasnoticias.com.ar/mostrarnoticia1.php?id_noticia=22585).
- [20] midebien, «Cuanta erosión resiste un parque eólico,» [En línea]. Available:  
[https://www.midebien.com/consejos-practicos-para-medir-bien/cuanta-  
lluvia-cuanta-erosion-resiste-parque-eolico](https://www.midebien.com/consejos-practicos-para-medir-bien/cuanta-lluvia-cuanta-erosion-resiste-parque-eolico).
- [21] Fijerrer, «Atmosfera terrestre,» [En línea]. Available:  
<https://fjerrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion03/Imagen1.png>.
- [22] pinteres,  
«[https://www.google.com.ec/search?dcr=0&biw=1242&bih=579&tbm=isc  
h&sa=1&ei=unDVWvOhFdD0zgKC3ZewDA&q=direccion+del+viento+e  
n+la+atmosfera&oq=direccion+del+viento+en+la+atmosfera&gs\\_l=psy-  
ab.3...13661.18261.0.18475.28.22.4.1.1.0.306.2415.0j14j1j1.16.0....0...,](https://www.google.com.ec/search?dcr=0&biw=1242&bih=579&tbm=isch&sa=1&ei=unDVWvOhFdD0zgKC3ZewDA&q=direccion+del+viento+en+la+atmosfera&oq=direccion+del+viento+en+la+atmosfera&gs_l=psy-ab.3...13661.18261.0.18475.28.22.4.1.1.0.306.2415.0j14j1j1.16.0....0...,)»  
[En línea].

- [23] Esacademic, «esacademic,» [En línea]. Available:  
[http://www.esacademic.com/pictures/eswiki/80/Perfil\\_alar\\_1.svg](http://www.esacademic.com/pictures/eswiki/80/Perfil_alar_1.svg).
- [24] C. C. A.-S. License, «National Advisory Committee for Aeronautics,» 18 11 2017. [En línea]. Available:  
[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=National\\_Advisory\\_Committee\\_for\\_Aeronautics&oldid=103519322](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=National_Advisory_Committee_for_Aeronautics&oldid=103519322).
- [25] T. ECUADOR, «El Tecnológico de Monterrey, tiene presencia en América Latina a través de sus 4 oficinas ubicadas en Perú, Panamá, Colombia y Ecuador.,» [En línea]. Available: <http://www.itesm.la/ecuador/>.
- [26] Airfoiltools, «Airfoiltools,» [En línea]. Available:  
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca643418-il>.
- [27] C. C. A.-S. License, «Eje de transmisión,» Wikipedia, 16 07 2017. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Eje\\_de\\_transmisi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Eje_de_transmisi%C3%B3n).
- [28] Sistemcom, «Sistemcom,» [En línea]. Available:  
[http://www.sistemcom.com.mx/product.php?id\\_product=911](http://www.sistemcom.com.mx/product.php?id_product=911).
- [29] C. d. ruliman, «Casa del ruliman,» [En línea]. Available:  
<https://www.casadelruliman.com/index.php?/sitio/productos/1-rulimanes-chumaceras>.
- [30] M. compresor, «Cojinete,» [En línea]. Available:  
<https://www.mundocompresor.com/diccionario-tecnico/cojinete>.
- [31] wordpress, «Elementos de fricción. Cojinetes – mecanismos1bach,» [En línea]. Available: <https://mecanismos1bach.wordpress.com/otros-elementos/elementos-de-friccion-cojinetes/>.
- [32] Piñon, «Imagen gratis en Pixabay - Piñón, Engranaje, Mecánica,» [En línea]. Available: [/es/pi%C3%B1%C3%B3n-engranaje-mec%C3%A1nica-640484/](https://es/pi%C3%B1%C3%B3n-engranaje-mec%C3%A1nica-640484/).
- [33] C. C. A.-S. License, «Cadena de transmisión,» [En línea]. Available:  
[https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cadena\\_de\\_transmisi%C3%B3n&oldid=106463726](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cadena_de_transmisi%C3%B3n&oldid=106463726).
- [34] Indiamart, «12b 1 10 Feet Roller Chain,» [En línea]. Available:  
<https://www.indiamart.com/proddetail/12b-1-10-feet-roller-chain-13424858191.html>.
- [35] Polmangueras, «POLEA 2 CANALES REFORZADA : Poleas, & Mangueras,» [En línea]. Available:  
[http://polmangueras.com/index.php?main\\_page=index&cPath=151\\_152\\_175\\_166\\_168](http://polmangueras.com/index.php?main_page=index&cPath=151_152_175_166_168).
- [36] Nijeva, «Nijeva,» [En línea]. Available:  
<https://nijeva.wikispaces.com/Producto+Nicolas+Riveros+%2A+Correa+de+reparticion>.
- [37] PAULSTRA, «PAULSTRA,» [En línea]. Available:  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2649/34593-3.pdf>.



- [38] Fluke, «Anaizador de redes,» [En línea]. Available:  
<http://solutions.fluke.com/eses/fluke-430>.
- [39] G. S. F. P. S. M. a. B. B. R. Moreno, «"Making room for the boom",» *Power and Energy Magazine*, vol. 8, n° 5, pp. 36-46, 2010.